EDIÇÃO 411-A • JANEIRO / 2020

DOSSIÊ

SUPER INTERESSANTE

ENERGIA NUCLEAR

Os bastidores dos maiores acidentes nas usinas.

P. 50

O físico que desenhou a bomba brasileira.

P. 32

Entenda como funciona um reator.

P. 36

Fusão nuclear: como transformar água em energia.

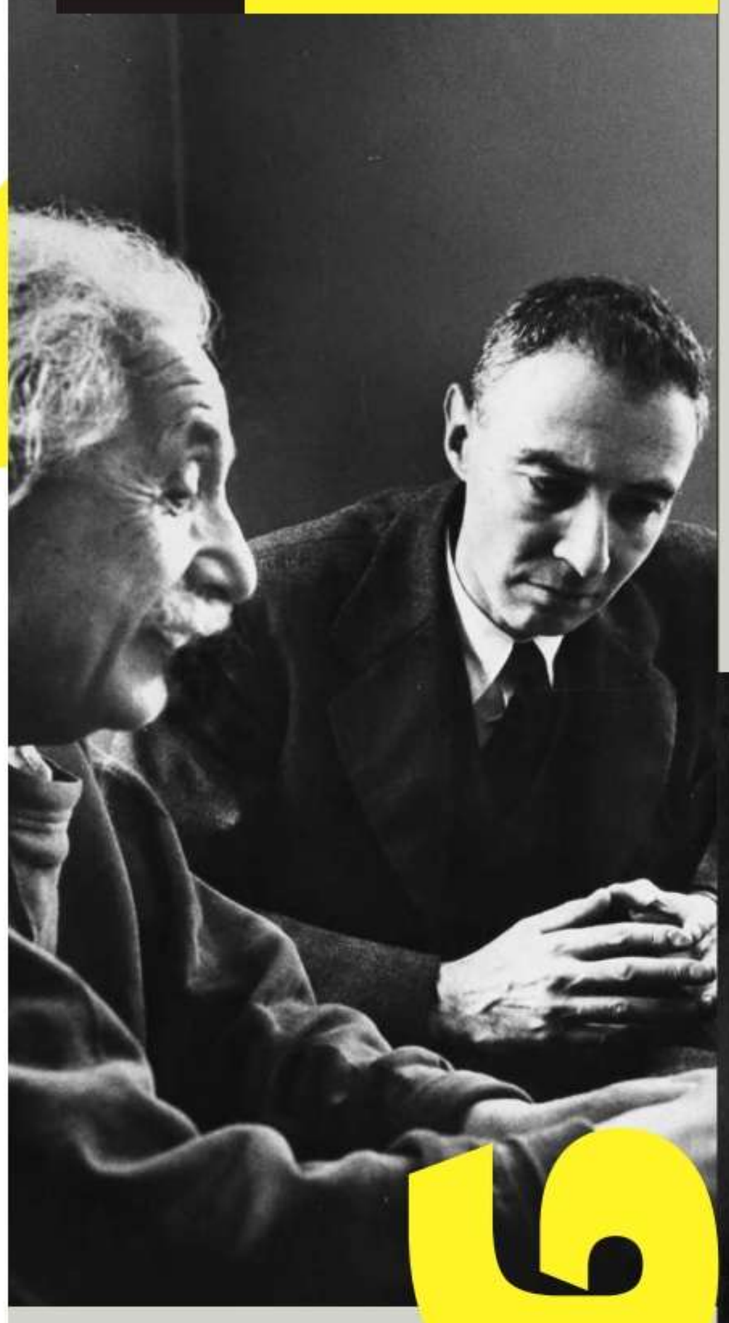
P. 46

A força oculta no interior dos átomos pode destruir o mundo. Mas também salvá-lo.

Abril

ENERGIA NUCLEAR

DA TEORIA
À PRÁTICA



CARTA

A VOLTA DA ERA ATÔMICA

FILHA DA SEGUNDA GUERRA, A INDÚSTRIA NUCLEAR SE DESENVOLVEU MUITO RÁPIDO. A capacidade de romper átomos para gerar eletricidade e destruição era conhecida, na teoria, fazia pouco tempo quando os avanços da Alemanha sobre a Europa, da Itália sobre a África e do Japão sobre a Ásia aceleraram a corrida armamentista que marcou o restante do século 20.

Se em 1935 usar nêutrons livres para atacar átomos pesados parecia coisa de cientista maluco, em 1945 esse mecanismo provocava a destruição absoluta de Hiroshima e Nagasaki. Menos de 20 anos depois e já havia bombas milhares de vezes mais poderosas, detonadas até mesmo no espaço. E também usinas capazes de gerar eletricidade (e resíduos radioativos).

Essa é a história que você vai conhecer nesta edição especial: dos tempos ingênuos em que os moradores de Las Vegas pagavam ingresso para assistir a detonações de bombas atômicas até a era de Chernobyl, quando a nuvem radioativa que cobriu a Europa deixou marcas definitivas no imaginário popular – prova disso é o sucesso de crítica e de público da série da HBO sobre o esforço descomunal para conter o estrago e investigar as causas do acidente que lançou grafite contaminado sobre as calçadas dos arredores da usina nuclear de Chernobyl.

Mas essas páginas contam muito mais do que história: explicam como funcionam as bombas e as usinas nucleares que estão na ativa hoje (inclusive Angra 1 e 2). Também debatem o futuro, que promete ser movimentado.

Do ponto de vista militar, as maiores nações se aquecem para uma nova corrida armamentista de consequências imprevisíveis. Em paralelo, a indústria de geração de eletricidade luta para superar os graves acidentes que marcaram sua trajetória enquanto batalha pelo próximo passo, o da fusão nuclear, que não gera resíduos radioativos.

Boa leitura.

TIAGO CORDEIRO, EDITOR

O INÍCIO DE TUDO 6
As pesquisas que levaram às primeiras bombas.

A DÉCADA DAS BOMBAS 14
Os anos mais explosivos da indústria militar da Guerra Fria.

DESTRUIÇÃO ALÉM DA IMAGINAÇÃO 38
A maior bomba da história alcançou 64 km de altura.

ÁTOMOS QUE MATAM

A MÁQUINA DE DESTRUIR MUNDOS

A bomba de hidrogênio usa uma arma atômica convencional como espoleta.

QUANDO O MUNDO QUASE ACABOU

Dez momentos que poderiam provocar o inverno nuclear.

O PERIGO VEM DO MAR

A energia atômica revolucionou os submarinos de guerra.

ARMAS DA ATUALIDADE

ARSENAL DO SÉCULO 21

As novas armas nucleares de China, Rússia e EUA.

A BOMBA BRASILEIRA

Ela existe: na teoria. Leia a entrevista com o criador.

ENERGIA NUCLEAR

COMO SE QUEBRA UM ÁTOMO

Uma usina nuclear é parecida com uma termelétrica comum. Com uma grande diferença.

ANGRA DOS REIS, CAPITAL NUCLEAR

Angra 1 e 2 nunca registraram acidentes. Angra 3 está longe da inauguração.

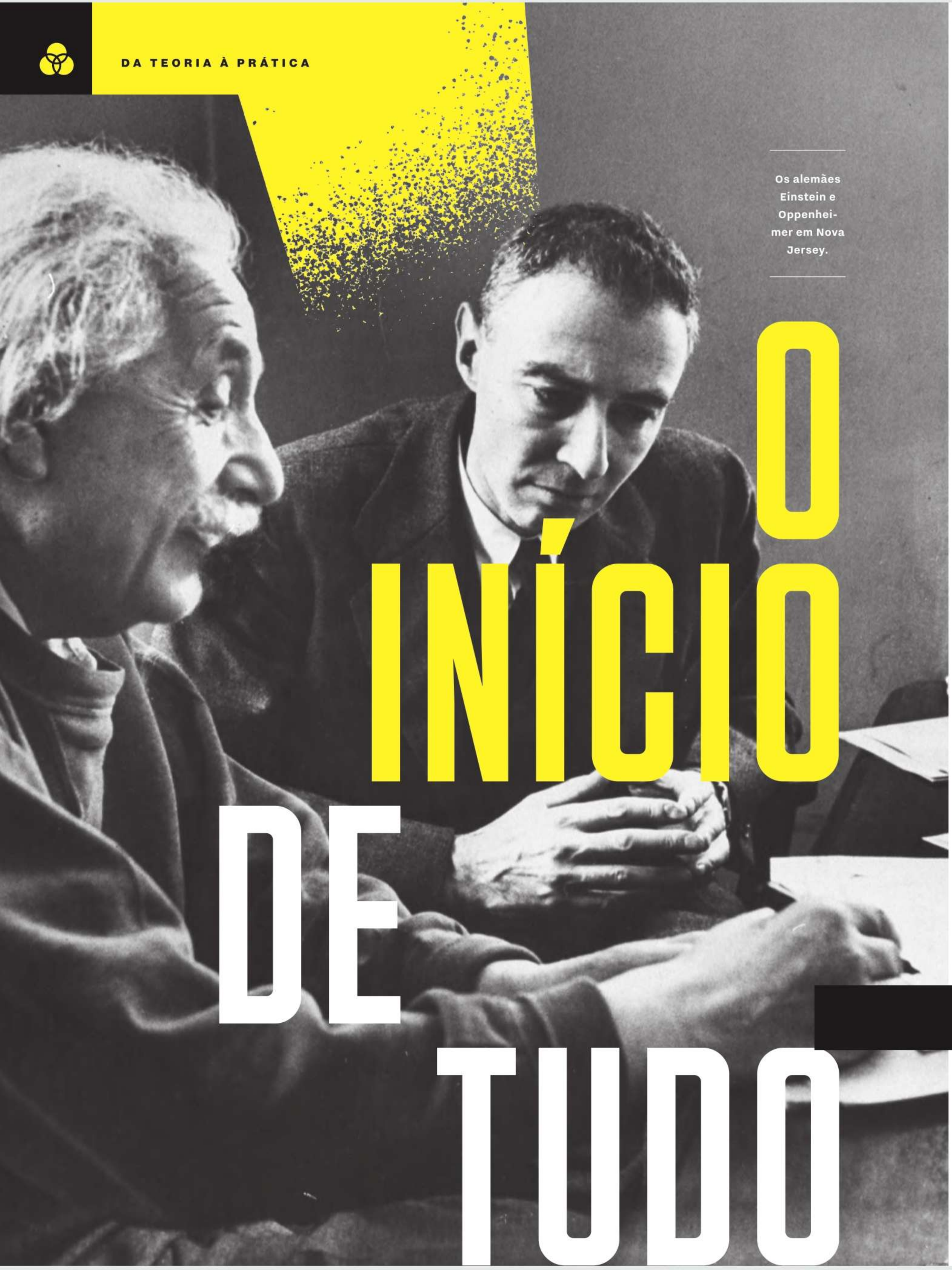
O FUTURO ESTÁ NA FUSÃO

É mais eficiente e limpo. Mas imitar o Sol ainda não funcionou em larga escala.

OS PIORES ACIDENTES

RADIAÇÃO À SOLTA

Os bastidores de Chernobyl, Three Mile Island, Mayak, Fukushima e Goiânia.



Os alemães Einstein e Oppenheimer em Nova Jersey.

O INÍCIO DE TUDO

A SEGUNDA GUERRA ACELEROU AS PESQUISAS SOBRE A ESTRUTURA DOS ÁTOMOS. E AS MELHORES MENTES DA ÉPOCA USARAM ESSES CONHECIMENTOS PARA CRIAR A ARMA MAIS DESTRUIDORA JÁ VISTA.

POR **EDUARDO SZKLARZ**

O pai da bomba atômica, Robert Oppenheimer, ao lado do chefe, o general Groves.

A CONTAGEM REGRESSIVA COMEÇOU QUANDO AINDA ESTAVA ESCURO. Fumando um cigarro atrás do outro, o físico americano Robert Oppenheimer respirou fundo no bunker onde os cientistas monitoravam o primeiro teste nuclear da história. A 9 km dali, no topo de uma torre de aço de 30 m de altura, uma bomba de plutônio estava a ponto de explodir. "A Engenhoca", como a chamavam, era um emaranhado de fios e parafusos que destoava da árida e serena paisagem do Novo México, EUA. Oppenheimer deu mais algumas baforadas até que, naquele 16 de julho de 1945, a contagem regressiva finalmente chegou a zero.

Às 5h29min45s, um clarão iluminou as montanhas com uma energia equivalente a 20 mil toneladas de TNT. O rugido da onda de choque estremeceu o bunker e retumbou pelo deserto, onde seria sentido a 160 km de distância. O calor do ponto zero fez a torre de aço evaporar e calcinou a areia num raio de 700 metros, transformando-a num lençol de vidro. Os cientistas avistaram com terror a imensa bola de fogo no horizonte, que exalava uma nuvem em forma de cogumelo de 12 km de altura.

Petrificado, Oppenheimer murmurou um verso do *Bhagavad-Gita*, texto sagrado do hinduísmo: "Transformei-me na morte. A destruidora de mundos". Dias depois, a arma mais letal já construída seria usada contra Hiroshima e Nagasaki, no Japão, causando uma devastação sem precedentes.

FÍSICA QUÂNTICA

A "Engenhoca" não surgiu de repente. Ela foi fruto de descobertas científicas que, nos anos 1920 e 30, provaram que a bomba nuclear era possível. As primeiras pistas vieram em 1900, quando o alemão Max Planck lançou as bases da teoria quântica – que descreve fenômenos em escalas diminutas, como a atômica. Planck sugeriu que a luz emitida por materiais aquecidos podia ser medida em "pacotes de energia". E chamou cada pacote de *quantum*.

Em 1905, Einstein aprimorou a teoria de Planck ao mostrar que certos materiais emitem elétrons quando atingidos por radiações eletromagnéticas (como a luz). Em 1911, o neozelandês Ernest Rutherford deu mais um passo ao provar a existência do núcleo atômico, onde os prótons (partículas positivas) são circundados pelos elétrons (negativos). E em 1913 o dinamarquês Niels Bohr juntou tudo isso num modelo ainda mais preciso, propondo que os elétrons giram ao

Getty Images

redor do núcleo em órbitas com níveis de energia quantizados, ou seja, múltiplos de um quantum.

Daí a coisa deslanchou. Nos anos 1920, o físico Max Born transformou a Universidade de Göttingen (Alemanha) no templo da mecânica quântica, com a colaboração de cientistas europeus como Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger e Paul Dirac. Entre eles havia também um americano: Robert Oppenheimer, aluno de doutorado de Born. Oppenheimer recebeu seu PhD com louvor em Göttingen e voltou aos EUA em 1929 para lecionar física na Universidade da Califórnia, em Berkeley. Lá ele descobriu sua vocação para a liderança – e seu carisma entre os alunos.

"Oppie, como ficou conhecido, logo atingiu o status de cult", diz o escritor Paul Strathern no livro *Oppenheimer e a Bomba Atômica em 90 Minutos*. "Alto e magro como um graveto, Oppie escrevia artigos com Dirac, discutia teoria quântica com Bohr, falava oito idiomas e escrevia poesia de vanguarda." Com a ascensão do nazismo, em 1933, Oppie financiou organizações antifascistas e mergulhou na política de esquerda influenciado por uma namorada, embora não tenha se filiado ao Partido Comunista. E abriu as portas para gênios da teoria quântica que chegavam aos EUA fugindo de Hitler e Mussolini.

Entre esses gênios estavam o italiano Enrico Fermi e o húngaro Leo Szilard – que seriam fundamentais para a construção da bomba atômica. Mas ainda faltava uma descoberta para torná-la viável.

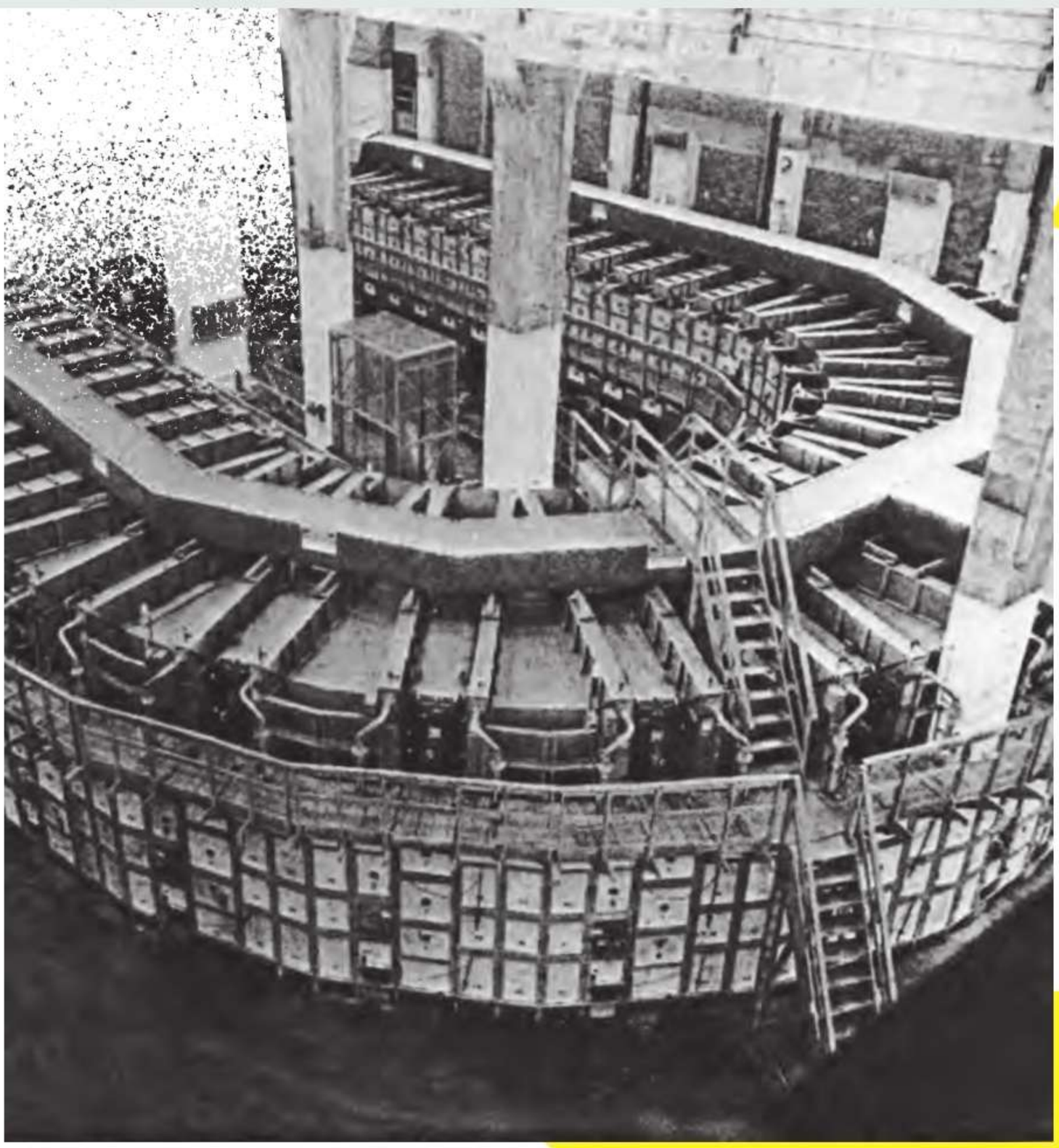
A quinta conferência de Solvay, na Bélgica, colocou 17 prêmios Nobel para debater física quântica em 1927.

Benjamin Couprie, Institut International de Physique de Solvay/ Wikimedia Commons

OS TESSERACT DE HITLER

A Alemanha criou cubos de urânio parecidos com os da Marvel.

No Universo Marvel, os Vingadores conseguem alterar a realidade graças ao cubo cósmico Tesseract, que contém a Joia do Espaço. Um dispositivo tão poderoso poderia causar estragos se caísse nas mãos erradas. E algo do tipo quase aconteceu na Segunda Guerra. Um artigo de cientistas da Universidade de Maryland indica que Hitler possuía 664 cubos de urânio com formato parecido ao do Tesseract, cada um com 2,2 quilos. O físico Werner Heisenberg, que recebeu o Nobel de 1932 pela criação da mecânica quântica, tentou construir um reator com os cubos numa caverna sob um castelo em Haigerloch, no sudeste da Alemanha. Heisenberg submergiu os Tesseract num tanque de água pesada, unidos por aço entrelaçado e cercados por um anel de grafite. O aparelho foi batizado de B-VIII. Representou o auge do programa nuclear nazista, mas não foi o suficiente: o equipamento provocava fissão nuclear de forma irregular e não se mostrou capaz de manter um ciclo sustentável, que garantisse um funcionamento constante.



Eletroímã utilizado para enriquecer urânio dentro do Complexo de Segurança Nacional Y-12, em operação no Tennessee.

FISSÃO NUCLEAR

Quando você quebra o núcleo de um átomo em duas partes, ele libera uma dose cavalar de energia. Einstein tinha previsto isso em 1905 com a fórmula E = mc2, em que E é energia, m é massa e c é a velocidade da luz. Como a luz viaja a quase 300 mil km/s, mesmo uma pequena massa contém uma quantidade de energia abismal. A hipótese de Einstein ficou no papel por quase três décadas. Em 1932, porém, o inglês James Chadwick descobriu o nêutron, a partícula neutra do núcleo atômico. E a teoria começou a virar realidade.

Em Berlim, o químico alemão Otto Hahn e sua colega austríaca Lise Meitner usaram nêutrons para bombardear átomos de urânio – o elemento mais pesado da natureza, com 92 prótons no núcleo. O objetivo era produzir elementos ainda mais pesados. Meitner teve que fugir para a Suécia em 1938 por ser judia, mas Hahn continuou a pesquisa e a manteve informada dos resultados. E veio a surpresa: ao analisar o urânio bombardeado, Hahn e o químico Fritz Strassmann encontraram partículas de bário (um elemento mais leve).

Hahn não compreendeu o que havia acontecido, mas Meitner matou a charada: ao ser bombardeado por nêutrons, o núcleo do urânio se dividira em dois, produzindo bário e uma enorme quantidade de energia. Tal como Einstein tinha previsto. Ou seja, Hahn e Meitner haviam descoberto a "fissão nuclear" (nome dado pelo físico Otto Frisch, sobrinho de Meitner). Sem perceber, eles acabavam de abrir a porta para a bomba atômica. E o pior: graças aos artigos publicados sobre a fissão em 1939, o Terceiro Reich agora sabia como obtê-la.

Mesmo assim, o mundo científico não achava que havia motivo para alarme. Bohr, por exemplo, considerava remota a possibilidade de enriquecer urânio em larga escala. Por um motivo simples: como o U-235 (o urânio físsil) está presente em apenas 0,7% do urânio natural, seria extremamente difícil e custoso obtê-lo em quantidade suficiente para uma grande explosão. Isso porque o urânio-238, o mais comum na natureza, é estável demais para reagir. Apenas o húngaro Leo Szilard farejou o perigo iminente. "Para evitar que os alemães produzissem a bomba, Szilard propôs aos colegas em fevereiro de 1939 que mantivessem as pesquisas com o urânio em segredo", diz o historiador dinamarquês Helge Kragh no livro *Quantum Generations*.

A sugestão foi recebida com ceticismo. Assim, em agosto de 1939, Szilard e Einstein escreveram uma carta secreta ao presidente Roosevelt, advertindo que "bombas extremamente poderosas de um novo tipo" poderiam ser construídas em breve. A entrega da carta foi adiada por causa do início da Segunda Guerra, em 1º de setembro. Roosevelt só a recebeu em outubro – e deu sinal verde para o ultrassecreto Projeto Manhattan. O objetivo: construir a bomba atômica americana antes que os nazistas fizessem a deles.

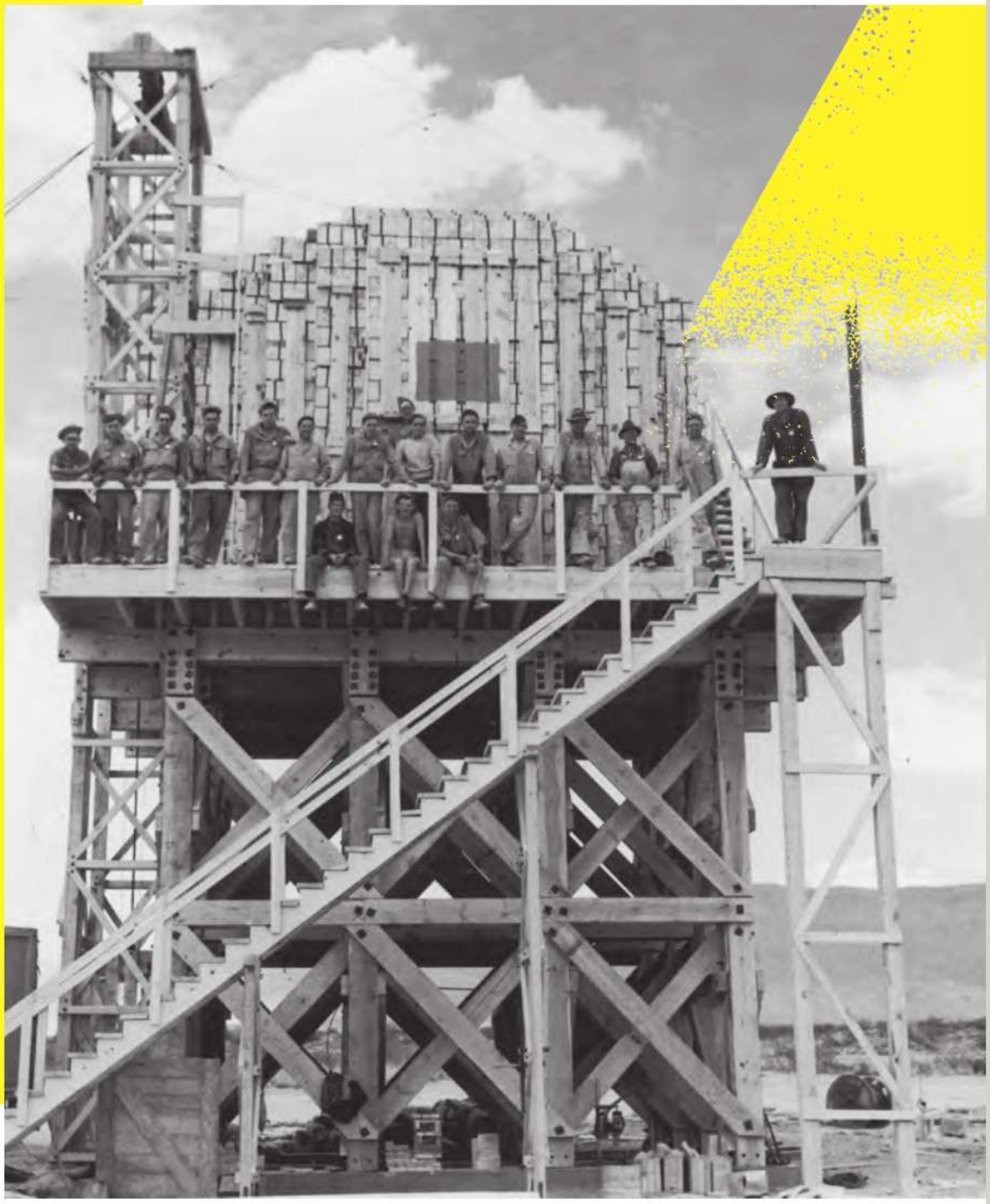
A iniciativa começou timidamente. O governo dos EUA criou a Comissão Consultiva do Urânio (codinome S-1) para testar a fissão em larga escala, e destinou US$ 6 mil (cerca de US$ 100 mil atuais) para que Fermi e Szilard comprassem material físsil. O programa se expandiu após o ataque japonês a Pearl Harbor, em 1941, que marcou a entrada dos EUA na guerra. Fermi construiu então um reator nuclear numa quadra de squash na Universidade de Chicago. O risco era enorme: qualquer erro podia gerar uma grande explosão. "Felizmente para os inocentes cidadãos de Chicago, Fermi sabia o que estava fazendo. Dedos cruzados e, em 2 de dezembro de 1942, o primeiro reator nuclear do mundo produziu a primeira reação nuclear controlada e autossustentada", diz Strathern. A partir daí, o Projeto Manhattan entrou numa nova fase.

Leslie R. Groves/Wikimedia Commons

LOS ALAMOS

Em 1942, um platô isolado no meio das montanhas do Novo México despertou do silêncio para abrigar o maior grupo de cientistas já reunido. O Exército dos EUA comprou o único edifício que havia ali, a pequena escola Los Alamos, para servir como a primeira instalação do Projeto Manhattan. O local foi escolhido por Oppenheimer, alçado a diretor do programa graças às suas qualidades peculiares: ele dominava a fissão nuclear, conhecia os pesos-pesados da ciência e saberia como inspirar a tropa de pesquisadores que começava a chegar. Alguns já haviam ganhado o Nobel, como Fermi; outros o ganhariam em breve, como aconteceria com o físico Richard Feynman.

O comando do Projeto Manhattan ficou a cargo do general Leslie R. Groves, o engenheiro militar que tinha construído o Pentágono. Seus subordinados o descreviam como áspero, exigente e egoísta, mas altamente capaz. "Groves e Oppenheimer eram água e vinho. Mas, para a surpresa geral, o esbelto e brilhante físico e o corpulento e impetuoso general se deram bem desde o início", diz Strathern. Por sua postura pacifista, Einstein não seria informado dos avanços de Los Alamos. Meitner foi convidada a participar, mas declinou: "Não tenho nada a ver com a bomba", disse ela.



Parte dos mais de 130 mil trabalhadores envolvidos no Projeto Manhattan.

Em poucos meses, o platô se transformou numa espécie de Vale do Silício nuclear, com indústrias, laboratórios e edifícios enfileirados. Outras 30 instalações espalhadas pelos EUA ajudavam na busca pela bomba, incluindo a usina de enriquecimento de urânio Oak Ridge (Tennessee) e o complexo de produção de plutônio Hanford (Washington). O Reino Unido e o Canadá também colaboraram. No total, mais de 130 mil pessoas trabalharam no projeto. Assim, o que começou com US$ 6 mil chegaria a mais de 2 bilhões (23 bilhões em valores de hoje) no final da guerra. Uma empreitada maior do que toda a indústria automobilística dos EUA na época.

Claro que era impossível manter tanta gente de boca fechada. Portanto, para evitar que o Japão, a Alemanha e até a então aliada URSS soubessem do segredo, só um punhado de cientistas e militares conhecia o real objetivo de tudo aquilo. Groves recebeu relatórios de inteligência alertando que Oppie era comunista, mas não deu bola. Confiava que o físico e sua equipe dariam conta dos desafios titânicos do projeto. Um deles era calcular a "massa crítica", ou seja, a menor quantidade de urânio-235 necessária para uma reação nuclear em cadeia (que é capaz de se sustentar sozinha, gerando grande quantidade de energia). Outro era produzir o recém-descoberto plutônio-239, que também poderia ser usado. E, claro, ainda era preciso bolar um jeito de detonar a bomba.

"As bombas deviam estar prontas quando as quantidades necessárias de urânio e plutônio também estivessem prontas. Isso provavelmente lhes dava dois anos", diz Richard Rhodes no livro *The Making of the Atomic Bomb*. Os cientistas primeiro inventaram um detonador do tipo "revólver": um explosivo disparava uma bala de urânio, que viajava por um cilindro no interior da bomba até atingir o alvo, também de urânio. Com o impacto, a massa crítica era ultrapassada e a explosão nuclear acontecia. Ok, mas em qual velocidade a bala teria de ser disparada? Essa era só uma das incógnitas.

Getty Images

SHOWS ATÔMICOS EM LAS VEGAS

Turistas pagavam ingresso para ver os testes nucleares de perto.

Em 1951, apenas seis anos após a tragédia de Hiroshima e Nagasaki, os cogumelos atômicos viraram a grande atração de Las Vegas. É que o Departamento de Energia dos EUA inaugurou a Área de Testes de Nevada a 105 km da cidade, e as pessoas descobriram que podiam acompanhar o clarão das explosões em plena noite –sobretudo do alto dos cassinos. A economia local bombou. Os turistas pagavam ingresso para ver as detonações no deserto e faziam fotos com os cogumelos ao fundo. A Câmara do Comércio publicava folhetos com os horários dos testes e os melhores pontos de observação. Os hotéis organizavam festas com baile, comida farta e "coquetéis nucleares" para se embriagar. A cidade ganhou até o concurso Miss Bomba Atômica, que inspirou uma canção do The Killers. Cem testes iluminaram o céu de Las Vegas até 1962, quando o show acabou. Quem pagou o pato foi a cidade vizinha de St. George, Utah, para onde o vento levava as partículas radioativas. Seus habitantes sofreram um aumento da incidência de câncer que durou até os anos 1980.

TRINITY SITE

Em 1943, o físico Seth Neddermeyer propôs outra solução: rodear a massa de urânio com explosivos para "implodi-la". Isso comprimiria o urânio até que alcançasse a densidade crítica necessária para desatar a reação em cadeia. "O método da implosão era mais complexo que o da bala, mas os cientistas descobriram que era o único que poderia ser usado numa bomba de plutônio", afirma Kragh. Isso porque o plutônio emitia grande quantidade de nêutrons "dispersos", que poderiam provocar fissão prematura caso o método da bala fosse utilizado. Ou seja: a bomba explodiria antes do tempo, e com menos potência.

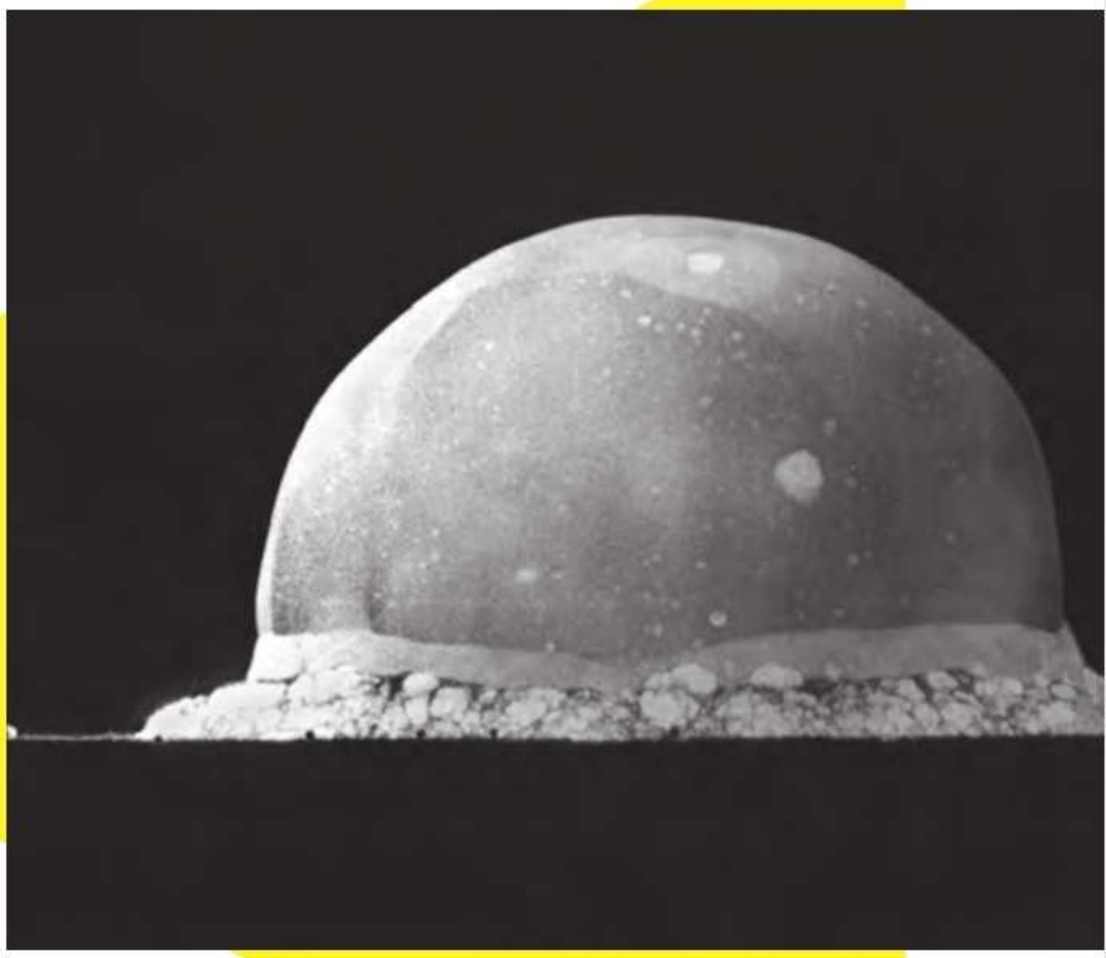
Oppie gostou da solução de Neddermeyer, e confiou-lhe 50 homens para encontrar um jeito de iniciar uma detonação uniforme no interior da bomba. O "grupo da implosão" passou o verão de 1943 detonando canos com explosivos ao redor de Los Alamos. No início de 1944, a paisagem estava devastada, e nada da solução. Impaciente, Oppie contou com a ajuda de Bohr (que fugira da Dinamarca, ocupada pelos nazistas) e do físico alemão Klaus Fuchs, que chegara com cientistas britânicos. Mas foi graças aos cálculos do físico Richard Feynman e do matemático John von Neumann que o grupo alcançou uma detonação uniforme. A bomba de plutônio estava pronta.

O local da prova, batizado de Trinity Site, era um ponto ermo a 97 km do município de Alamogordo, no Novo México. Foi lá que a nuvem em forma de cogumelo assombrou os cientistas em 16 de julho de 1945. "O país inteiro foi iluminado por uma luz abrasadora muitas vezes mais intensa que a do Sol do meio-dia", escreveu o general Thomas Farrell, vice-comandante do Projeto Manhattan. "Era dourada, roxa, violeta, cinza e azul."

Os EUA enfim possuíam a bomba, mas fazia sentido continuar com os testes? A Alemanha tinha se rendido em maio, Adolf Hitler estava morto. "Oppenheimer foi informado de que nada mudaria. O presidente mudara (Roosevelt morreu e foi sucedido por seu vice, Truman), o alvo mudara (tornara-se o Japão) – mas nada havia mudado", diz Strathern.

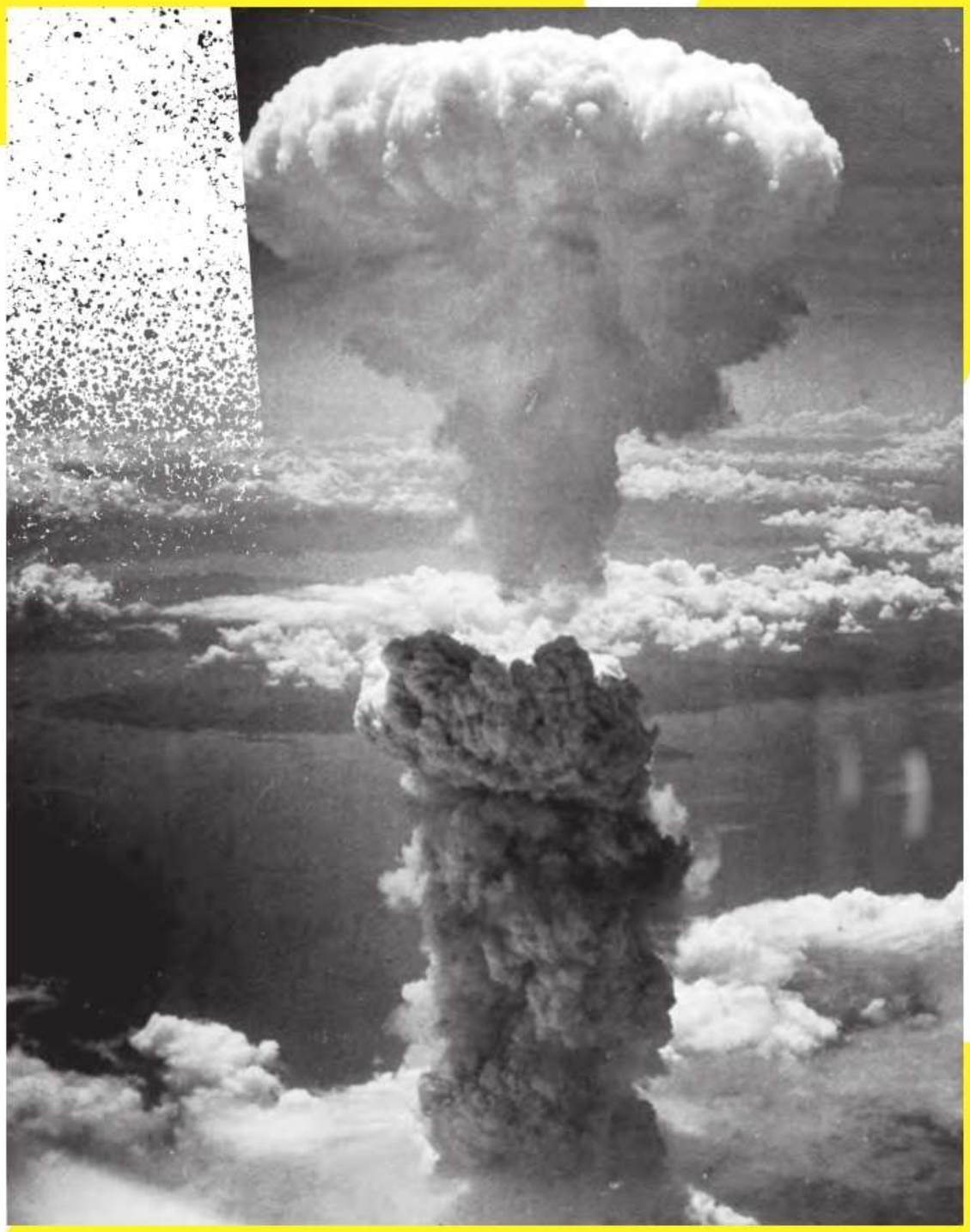
Em 17 de julho, ao chegar à Conferência de Potsdam para decidir o futuro da Alemanha, Truman contou a Stálin que os americanos tinham o artefato. O líder soviético sorriu, pois já sabia do "segredo" graças às informações transmitidas pelo físico Klaus Fuchs, seu espião em Los Alamos. "Espero que façam um bom uso da bomba contra os japoneses", limitou-se a dizer. Dito e feito.

Cúpula de 200 metros de altura registrada 0.016 segundo depois da detonação da bomba de Trinity Site, em 16 de julho de 1945.



Berlyn Brixner/Los Alamos National Laboratory/Wikimedia Commons

Os escombros de Hiroshima dias depois do primeiro ataque com bomba atômica da história.



HIROSHIMA E NAGASAKI

Na manhã de 6 de agosto de 1945, um solitário bombardeiro B-29 cruzou o céu de Hiroshima, no Japão. Batizado de Enola Gay (nome da mãe do piloto, o coronel Paul Tibbets), o avião despejou a bomba de urânio Little Boy sobre a cidade. Entre 60 mil e 80 mil pessoas morreram na hora. A 3 km da explosão, o engenheiro naval Tsutomu Yamaguchi caminhava ao lado de uma plantação de batatas quando um clarão o cegou. Jogou-se no chão para se proteger, mas a terra tremeu e o arremessou para longe.

"Sentado numa poça de lama, Yamaguchi percebeu que todo um lado de seu corpo ardia de calor. A pele exposta de seu braço direito estava literalmente torrada", diz o escritor americano Charles Pellegrino no livro *O Último Trem de Hiroshima*. Após os primeiros 5 segundos, a cidade tinha se transformado num lago de poeira amarelada em ebulição. O engenheiro sentiu náuseas e, ainda com dificuldade para enxergar, teve a impressão de que o lago de poeira parecia cheio de vermes – eram jatos giratórios de fumaça e fogo.

Nesse momento, o soldado Shigeru Shimoyama, que estava numa cidade vizinha, dirigiu-se ao Ponto Zero para socorrer os queimados. "A primeira vítima que ele encontrou não parecia um ser humano. Não tinha um rosto, só uma massa inchada de carvão sobre os ombros, cuja pele parecia couro de crocodilo", diz Pellegrino. Havia várias pessoas assim: incapazes de gritar sua dor, elas balbuciavam sons parecidos com os de gafanhotos.

Fazia semanas que os B-29 riscavam o céu do Japão jogando bombas convencionais. Hiroshima era um dos poucos centros industriais que não tinham sido alvos. Os moradores sabiam que era questão de tempo – só não imaginavam o tipo de ataque.

Foi esse o caso da viúva Hatsuyo Nakamura. Na véspera do bombardeio, ela havia levado os três filhos para uma área segura, como de costume. Voltou para casa de madrugada e colocou os filhos para dormir, quando o rádio transmitiu um novo alarme. "Ao ver as crianças tão cansadas, e pensando no número de caminhadas inúteis que haviam feito até a zona segura nas semanas anteriores, ela decidiu não seguir as instruções do locutor", diz o jornalista americano John Hersey no livro-reportagem *Hiroshima*. Nakamura ouviu um ruído ao longe e saiu da cozinha em direção ao quarto onde estavam os três filhos.

O cogumelo de Hiroshima, ícone da hecatombe nuclear.

"Mal deu um passo, alguma coisa a levantou e a fez voar até o cômodo contíguo", afirma Hersey. Quando Nakamura aterrissou, uma chuva de telhas a cobriu. Ela então escutou "Mamãe, socorro!" e viu a caçula enterrada até o peito. Acudiu a menina e respirou aliviada: os outros dois filhos também estavam a salvo. Haviam sobrevivido a apenas 1.215 metros da explosão.

"Foi um milagre", pensou Yamaguchi, ao se recompor na plantação de batatas. Mesmo ferido, ele regressou em 8 de agosto a Nagasaki, sua cidade natal, sem imaginar que ela seria o próximo alvo. No dia seguinte, o B-29 Bockscar, pilotado pelo major Charles Sweeney, jogou a bomba de plutônio Fat Man sobre Nagasaki, matando cerca de 40 mil pessoas. Arrasado pelos ataques nucleares e pela ofensiva soviética às suas colônias, o Japão se rendeu em setembro e a guerra acabou. O Projeto Manhattan foi desarticulado aos poucos, até encerrar as atividades em 1947.

Yamaguchi foi a única pessoa reconhecida pelo governo japonês que sobreviveu às duas bombas. Morreu em 2010, aos 93 anos. Muitos não tiveram a mesma sorte. Estima-se que 250 mil pessoas tenham perdido a vida, imediatamente ou nos anos seguintes, devido aos ataques.

Sorte, na verdade, é algo relativo para quem resistiu ao inferno. Os sobreviventes de Hiroshima e Nagasaki ficaram conhecidos como *hibakusha* ("pessoas afetadas pela explosão"). Sofreram preconceito e segregação, pois muita gente não quis se relacionar com eles para não ser "contagiada" pela radioatividade – um medo sem fundamento. O governo reconheceu 650 mil *hibakusha*. Em 2019, 145 mil deles ainda estavam vivos.

Getty Images, U.S. National Archives and Records Administration/ Wikimedia Commons

DA TEORIA À PRÁTICA

A DÉCADA DAS BOMBAS

ENTRE O COMEÇO DOS ANOS 1950 E O INÍCIO DOS 1960, ESTADOS UNIDOS E UNIÃO SOVIÉTICA PRODUZIRAM MILHARES DE ARMAS NUCLEARES, CADA VEZ MAIS POTENTES.

POR **TIAGO CORDEIRO**

Teste realizado pelos Estados Unidos no Atol de Bikini, em julho de 1948. A coluna de fumaça alcançou 1.500 m.

EM AGOSTO DE 1945, SÓ EXISTIAM DUAS BOMBAS ATÔMICAS NO MUNDO. Em 1950, eram 304. Em 1955, haviam se multiplicado por oito e chegado a 2.636. Em 1960, tinham saltado outras sete vezes: já eram 20.285. Não foi só a quantidade que disparou em ritmo alucinante. O clima de guerra fria levou Estados Unidos e União Soviética a desenvolver armas até três mil vezes mais poderosas do que os dois artefatos que arrasaram Hiroshima e Nagasaki. Quando elas se tornaram pesadas demais para os aviões transportarem, começaram a surgir então as ogivas, que poderiam ser despachadas nas pontas de mísseis balísticos.

Enquanto espalhavam radiação em locais isolados do planeta, os dois adversários mediam forças e colocavam o mundo em alerta. Parecia não haver limites para a corrida armamentista.

DETONAÇÕES EM SÉRIE

Os artefatos nucleares eram cada vez maiores e mais potentes. Por exemplo: a Mk-17, a maior bomba nuclear produzida pelos EUA até hoje, pesava 18 toneladas e tinha de 10 a 15 megatons (o equivalente a 10 a 15 milhões de toneladas de dinamite). Os americanos produziram mais de 200 unidades da Mk-17. Para testar modelos desse porte, era preciso utilizar até cinco paraquedas, a fim de reduzir a velocidade da queda e preservar a saúde dos pilotos – o que nem sempre dava certo; os casos de danos físicos em militares, provocados pela radiação e pela detonação, se multiplicaram.

Se não havia grandes cuidados com os pilotos, a atenção com os moradores dos campos de teste era menor ainda. Além do deserto de Nevada, os americanos tinham um local afastado de preferência, o Atol de Bikini, um banco de corais localizado 4.200 km a oeste do Havaí, no Oceano Pacífico, que abriga 23 ilhas em torno de uma lagoa de 600 km². Quando criou uma nova peça de roupa para ser usada na praia, nos anos 1940, o estilista Louis Réard previu o escândalo e batizou a novidade explosiva de "biquíni". Já os britânicos gostavam de detonar suas bombas em terras isoladas na Austrália e os franceses utilizaram a parte da Argélia que fica no deserto do Saara.

Os soviéticos, por sua vez, preferiam detonar artefatos em Nova Zemlia, no Círculo Ártico, e em Semipalatinsk, no nordeste do Cazaquistão. Além de 456 testes nucleares, incluindo a primeira bomba nuclear soviética, a RDS-1, detonada em 1949, e a primeira bomba termonuclear (que funde átomos, em vez de quebrá-los, e por isso é muito mais poderosa) desenvolvida pelos russos, que explodiu na região em 1953, Semipalatinsk foi escolhida para a construção da usina nuclear de Mayak. A instalação ficaria conhecida por seu longo histórico de vazamentos e acidentes, o mais recente deles em 2017 (leia mais a partir da página 50).

Numa época em que os efeitos da radiação não estavam totalmente esclarecidos, os testes provocavam danos colaterais permanentes. Em 10 de março de 1954, por exemplo, a bomba termonuclear americana Bravo, que em tese devia ter potência de 6 megatons, alcançou 15 megatons ao explodir.

Resultado: radiação espalhada por 8 mil quilômetros quadrados, que atingiu os próprios militares (28 americanos foram afetados) e pescadores de ilhas próximas, principalmente 23 japoneses embarcados em um navio de pesca nos arredores. Entre os moradores do Atol de Rondogelap, nas proximidades da detonação, um terço precisou tirar a tireoide, e os casos de leucemia e bebês com malformação se multiplicaram.

Ainda assim, do ponto de vista militar, a Operação Castelo, que incluiu a detonação da Bravo, foi um sucesso porque permitiu o desenvolvimento de bombas termonucleares. Mas o salto tecnológico foi ofuscado pela péssima repercussão pública dos experimentos.

Getty Images

Réplica da primeira bomba atômica desenvolvida pela URSS.

DETONAÇÕES NO ESPAÇO

Nem todos os testes formavam os famosos cogumelos no céu – resultado, aliás, da formação de uma bolha de gás superaquecida, que é mais quente que o ar da atmosfera e por isso sobe, carregando toneladas de ar e poeira; na medida em que fica mais alta e resfria, a bolha forma a "cabeça" do cogumelo. Muitas detonações eram subterrâneas. E algumas foram realizadas no espaço.

Entre 1958 e 1962, os Estados Unidos mandaram 14 bombas para além da atmosfera terrestre. Os russos, outras sete, no mesmo período. Do lado americano, destaque para a Starfish Prime. Cem vezes mais poderosa do que a bomba de Hiroshima, ela foi lançada a partir do Atol Johnston, no Oceano Pacífico, e detonada a 400 metros da superfície da Terra na noite de 9 de julho de 1962. Gerou uma aurora artificial (as partículas expelidas pela detonação formaram desenhos coloridos no céu) e afetou o campo magnético do planeta. A detonação queimou satélites e criou, no espaço, uma área altamente radioativa.

Mais uma vez nesse caso, os soviéticos reagiram com algum atraso, compensado por uma agressividade enorme. Em outubro de 1962, eles lançaram três bombas para o espaço, a partir do Cazaquistão. O resultado foi impressionante: mais de 500 km de linhas telefônicas e mil km de cabos de transmissão de energia acabaram inutilizados por culpa dos pulsos eletromagnéticos nucleares disparados pela detonação.

No espaço, na falta de atmosfera, a explosão não produz fogo, nem as ondas de choque e calor observadas na Terra. Por outro lado, sem ar para gerar resistência, a radiação alcança uma área 17 vezes maior. Nada disso estava claro enquanto os testes eram realizados. E os EUA consideraram a possibilidade de reagir ao feito dos russos detonando uma bomba atômica na Lua. Desenvolvido em 1958, o Projeto A119 não saiu do papel, em parte por causa dos sérios danos observados com a detonação da Starfish Prime e da bomba russa.

ARSENAL IMENSO

As detonações no Atol de Bikini e no espaço deixaram claro que a corrida armamentista tinha ido longe demais. Já existia uma Agência Internacional de Energia Atômica desde 1957, mas não era o suficiente. Em 1963, os dois lados do conflito – mais o Reino Unido, que já tinha suas próprias bombas – assinaram um tratado para limitar testes atômicos na atmosfera, no espaço e no mar.

Seguiram-se outros acordos militares e diplomáticos, estabelecendo limites para o poder de fogo das armas. Mas, de certa forma, já era tarde: se na década de 1930 as bombas atômicas eram uma distante discussão teórica, trinta anos depois o planeta convivia com a ameaça da hecatombe nuclear.

Atualmente, existem cerca de 15.800 bombas nucleares, mantidas por oito países – a Rússia lidera em quantidade, desde os anos 1980, seguida pelos Estados Unidos. Os dois juntos respondem por 93% do total, sendo que um terço está pronto para ser lançado em um prazo de poucas horas. Colocadas na ponta de mísseis balísticos intercontinentais (ICMBs), essas bombas podem atravessar o planeta e atingir alvos em quaisquer localidades. As bombas lançadas com paraquedas ficaram no passado.

Ao longo do tempo, parte expressiva do arsenal foi sendo desmontada: até hoje, foram construídas 128 mil diferentes ogivas nucleares, segundo estimativa produzida pelo *The Bulletin of the Atomic Scientists*, um periódico que monitora a evolução do setor. A maior parte teve as peças reaproveitadas na fabricação de outras bombas.

VERSÃO SUJA

A bomba de nêutrons é ainda mais radioativa.

Matar mais, reduzindo o estrago sobre edifícios. A partir de 1958, os americanos encontraram na bomba de radiação aumentada uma forma de alcançar esse objetivo. Popularmente conhecida como bomba de nêutrons, ela produz uma quantidade de radiação muito mais expressiva, porque 45% da energia é liberada na forma de nêutrons, contra 5% de uma bomba atômica tradicional. Do ponto de vista militar, uma arma desse tipo apresenta uma vantagem expressiva: fazer um estrago maior utilizando carga explosiva menor. Os Estados Unidos alegam que destruíram suas bombas de nêutrons em 2003, mas ainda detêm a tecnologia – há informações de que Rússia, França, China (e, talvez, Israel) também sejam capazes de produzir bombas de radiação aumentada.

Getty Images

INVENTÁRIO OFICIAL

O número de bombas conhecidas, por país, desde 1945.*

	Estados Unidos	União Soviética / Rússia	Reino Unido	França	China	Israel	Índia	Paquis-tão	TOTAL
1945	2	0	0	0	0	0	0	0	**2**
1950	299	5	0	0	0	0	0	0	**304**
1955	2.422	200	14	0	0	0	0	0	**2.636**
1960	18.638	1.605	42	0	0	0	0	0	**20.285**
1965	31.139	6.129	436	32	5	0	0	0	**37.741**
1970	26.008	11.643	394	36	75	8	0	0	**38.164**
1975	27.519	19.055	492	188	180	20	0	0	**47.454**
1980	24.104	30.062	492	250	205	31	0	0	**55.144**
1985	23.368	39.197	422	360	243	42	0	0	**63.632**
1990	21.392	37.000	422	505	232	53	0	0	**59.064**
1995	10.904	27.000	422	500	234	63	0	0	**39.123**
2000	10.577	21.500	281	470	232	72	14	13	**33.159**
2005	8.360	17.000	281	350	235	80	38	33	**26.388**
2010	5.000	12.000	225	300	240	80	80	70	**17.995**
2015	7.260	7.500	215	300	260	80	90	100	**15.805**

*** A Coreia do Norte não participa do levantamento porque as informações a respeito de seu arsenal atômico não são confiáveis.**

Fonte: Bulletin of the Atomic Scientists

DA TEORIA À PRÁTICA

AS BOMBAS TESTADAS EM 1961 PELA URSS ERAM MILHARES DE VEZES MAIS PODEROSAS DO QUE AS LANÇADAS CONTRA O JAPÃO. NENHUM ARTEFATO NUCLEAR SUPEROU A CAPACIDADE DE PROVOCAR ESTRAGOS DA MAIOR DELAS, A TSAR.

DESTRUIÇÃO ALÉM DA IMAGINAÇÃO

POR **TIAGO CORDEIRO**

ATÉ HOJE, DUAS BOMBAS nucleares foram detonadas durante uma guerra: a Little Boy de Hiroshima e a Fat Man de Nagasaki, ambas em 1945. Mas, a pretexto de realizar testes, oito países (Estados Unidos, União Soviética, Inglaterra, França, China, Índia, Paquistão e Coreia do Norte) detonaram outros 2.119 artefatos desde então.

De todos esses milhares de bombas, a campeã, disparada, é a Tsar: 50 megatons, o equivalente a 50 milhões de toneladas de dinamite ou a 3.300 bombas de Hiroshima. Some todos os explosivos (atômicos e comuns) detonados durante a Segunda Guerra Mundial inteira e você só vai ter um décimo da potência da Tsar. Batizada em homenagem ao czar Ivã, o Terrível, que reinou no século 16, era difícil de transportar e detonar.

Pesava 25 toneladas, foi lançada em 30 de outubro de 1961, a 10.500 metros do chão, e explodiu a 4.000 metros de altitude sobre a ilha de Nova Zemlia, no Ártico. A detonação formou um cogumelo de 64 quilômetros de altura. O bombardeiro Tupolev TU-95, que carregou a bomba, estava a 45 quilômetros do local da detonação, e ainda assim sofreu o impacto da onda de choque e perdeu mil metros de altitude. O impacto chegou longe: arrebentou janelas de casas que ficavam a 800 quilômetros de distância.

O estrago poderia ter sido ainda maior. Os pesquisadores envolvidos receberam a missão de criar uma bomba de 100 megatons. Por segurança, reduziram a capacidade destrutiva pela metade, ainda que, em tese, pudessem alcançar a potência solicitada por seus comandantes. Ainda assim, a Tsar deixou o mundo em choque – era uma demonstração clara do poder das bombas de hidrogênio *(leia mais sobre elas na próxima reportagem)*.

A esse teste se seguiu outro, de uma bomba de 24,2 megatons, detonada pelos soviéticos na mesma região, na véspera de Natal de 1962. Só naquele ano, os soviéticos realizaram 78 testes, sendo que quatro deles estão entre os maiores da história, logo depois da Tsar. Tornaram-se tão corriqueiros que os russos nem se deram ao trabalho de dar nome às bombas.

Com o fim da Guerra Fria, as detonações saíram de moda. Os Estados Unidos nunca mais provocaram nenhuma desde 1992. Dois anos antes, a União Soviética havia explodido sua última bomba. Neste século, só quem continua realizando testes é a Coreia do Norte. Mas a corrida armamentista foi retomada e pode levar a uma guinada na direção de novos testes *(leia mais na página 30)*.

A MÁQUINA DE DESTRUIR MUNDOS

POR **TIAGO CORDEIRO**

A BOMBA DE HIDROGÊNIO, OU TERMONUCLEAR, É A ARMA MAIS POTENTE JÁ CRIADA. TANTO QUE UTILIZA UMA BOMBA ATÔMICA CONVENCIONAL, DE FISSÃO, APENAS COMO DETONADOR.

"A BOMBA ATÔMICA CONVENCIONAL utiliza a energia produzida a partir da fissão nuclear, enquanto que a bomba termonuclear libera energia produzida a partir de fusão nuclear", explica o físico Ítalo Curcio, professor da Universidade Presbiteriana Mackenzie, em São Paulo. Em outras palavras: a fissão acontece quando nêutrons atingem o núcleo de átomos, geralmente de urânio, e os rompem, liberando energia. A fusão se caracteriza pela junção de núcleos, um feito muito mais difícil de alcançar e, principalmente, de controlar.

DETONAÇÃO EM ESTÁGIOS

Veja como funciona uma bomba H.

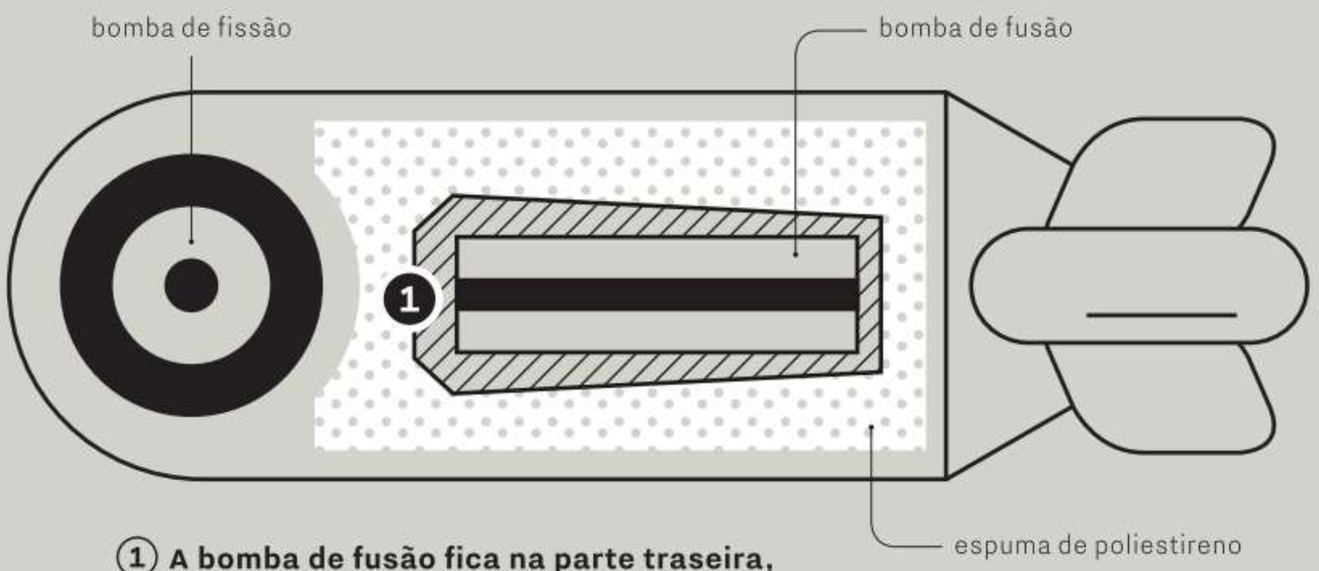
As bombas de fusão, que existem desde os anos 1950, são os artefatos explosivos mais perigosos já criados, sendo a bomba Tsar a mais poderosa entre todas *(mais sobre o tema na reportagem da página 18)*. Em geral, ela funciona com dois estágios.

A fusão só se torna viável no calor extremo. "Para alcançá-la é necessário ter antes um ambiente com altíssima temperatura, da ordem de uma dezena de milhões de graus Celsius", afirma Ítalo Curcio. Daí a utilidade de utilizar a quantidade descomunal de energia gerada pela fissão de urânio para alcançar as condições necessárias para fundir os átomos de hidrogênio.

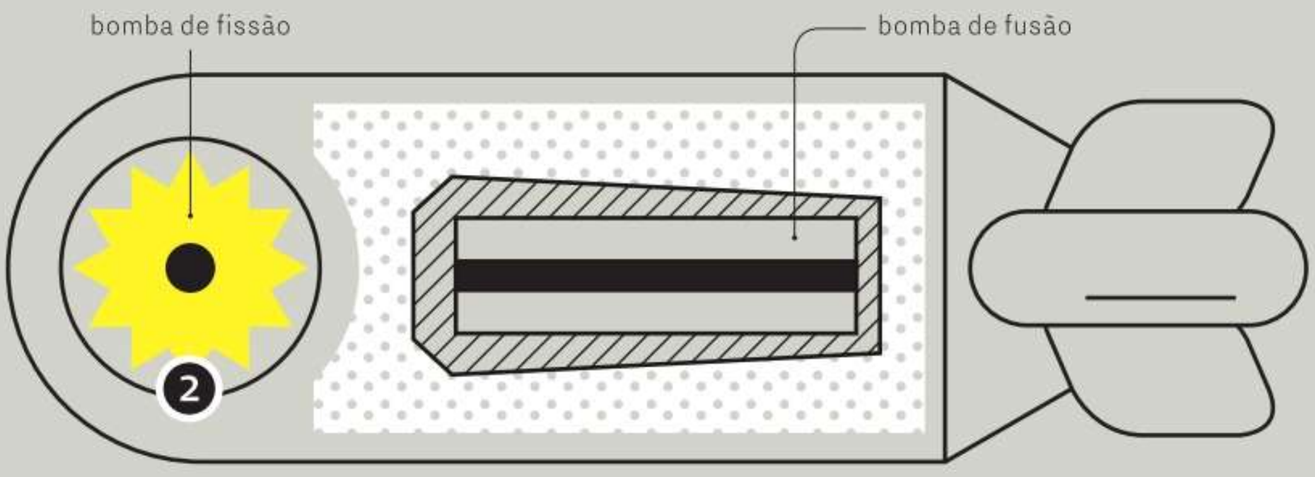
"Por isso, no caso da bomba de hidrogênio, ocorre primeiramente uma explosão interna, que proporciona essa temperatura, obtida a partir de uma bomba atômica convencional", descreve o professor da Universidade Mackenzie. "Com isso, consegue-se a temperatura necessária para provocar a fusão do hidrogênio, a partir da qual ocorre mais uma grande liberação de energia."

No papel, bombas H existem desde os anos 1930. Na prática, a primeira, a Ivy Mike, foi detonada pelos americanos em 1952, com a potência de 10 megatons. O experimento marcou uma nova era no desenvolvimento de armas nucleares. E levou a humanidade ao limite de sua capacidade de provocar destruição. Em alguns casos, como o da Tsar, ao segundo estágio seguiu-se um terceiro, formado por uma nova fusão de hidrogênio.

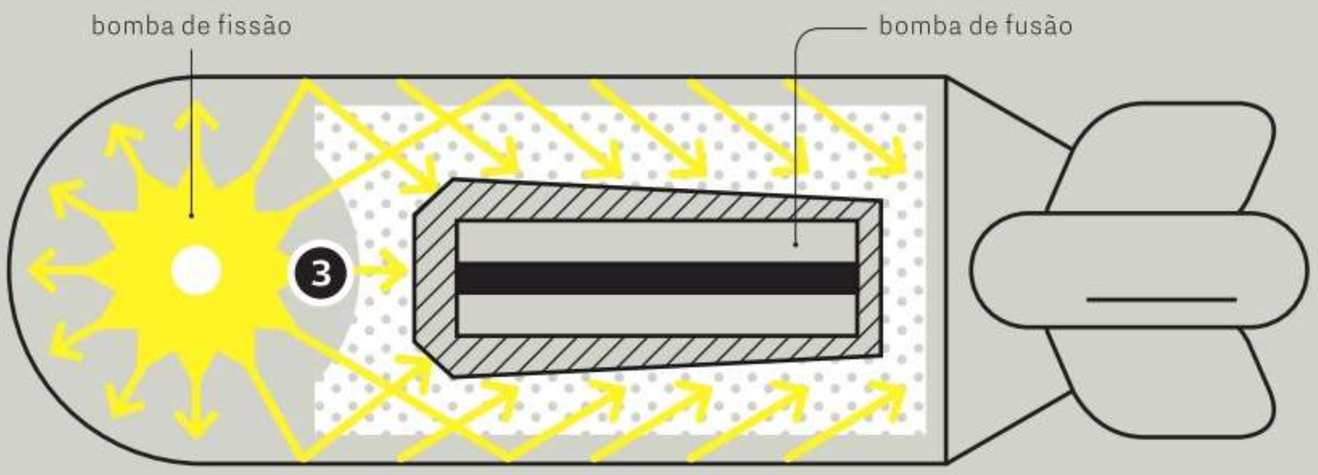
Mas por que a fissão serve para fazer tanto bombas quanto usinas nucleares, enquanto que a fusão ainda não foi aplicada em larga escala para a geração de energia elétrica, apesar de seis décadas de pesquisas? Essa resposta você encontra a partir da página 48.



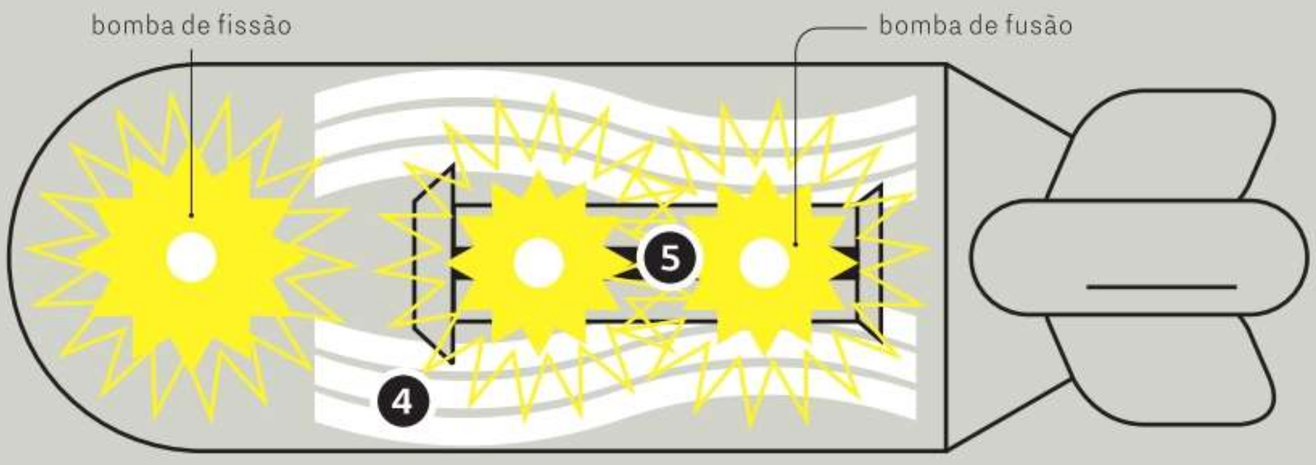
① **A bomba de fusão fica na parte traseira, suspensa por uma espuma de poliestireno.**



② **Tem início a detonação da bomba nuclear tradicional, com núcleo de urânio ou plutônio.**



③ **A radiação e o calor irradiam através da espuma.**



④ **A espuma comprime a segunda bomba.**
⑤ **Acontece a fusão de deutério, um isótopo do hidrogênio.**

?

PERGUNTA DIFÍCIL

Por que até hoje os terroristas não tiveram acesso a armas nucleares?

Imagine o estrago que a Al Qaeda, ou o Estado Islâmico, poderiam provocar com uma bomba atômica ou de hidrogênio em mãos. Por que nunca aconteceu? Não foi por falta de tentativas, certamente: pelo menos 22 países já documentaram casos de contrabando de urânio ou plutônio. Ou seja: existem contrabandistas vendendo a matéria-prima. Além disso, a receita para fabricar uma bomba simples é bastante conhecida. Se ainda assim os terroristas nunca provocaram uma hecatombe nuclear, é porque a quantidade mínima de urânio para criar uma bomba é 26 kg, muito acima dos poucos gramas disponíveis no mercado negro. E essa nem é a maior dificuldade: mesmo que alguém conseguisse acumular tanto minério, o processo de enriquecimento do urânio, para torná-lo capaz de fissionar e funcionar como combustível para uma bomba, é longo e complicado. E comprar urânio já enriquecido é difícil: até hoje foram registrados apenas 18 casos de roubo de material pronto para ser detonado, sempre em quantidades muito aquém do necessário. Agora, nada disso significa que nunca vá acontecer um ataque: afinal, criar uma bomba suja (que combina explosivos comuns com pouco material radioativo) é muito mais simples. E sua detonação já faria um estrago enorme numa metrópole.

ÁTOMOS QUE MATAM

QUANDO O MUNDO QUASE ACABOU

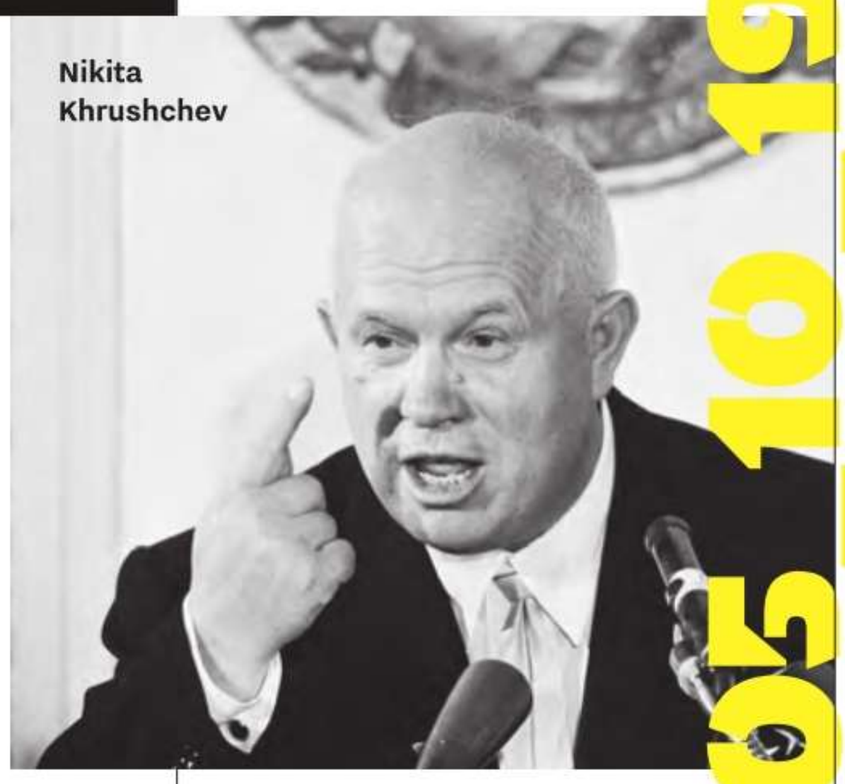
Erros fatais podiam ser cometidos dentro das salas de comando dos EUA e da URSS

MAL-ENTENDIDOS, COMPUTADORES DANDO PAU, MILITARES NERVOSOS, OU SIMPLESMENTE UMA FERRAMENTA CAINDO NO CHÃO. CONHEÇA DEZ MOMENTOS EM QUE A HECATOMBE NUCLEAR CHEGOU MUITO PERTO DE ACONTECER.

POR **TIAGO CORDEIRO**

05 | 10 | 1960

Se não fosse a presença do supremo governante soviético Nikita Khrushchev em Nova York, em 5 de outubro de 1960, a União Soviética possivelmente teria sido atacada – e reagiria, é claro. No auge da construção de ogivas nucleares de alcance destrutivo cada vez maior, radares instalados em Thule, na Groenlândia, identificaram um ataque de mísseis soviéticos na direção dos Estados Unidos. O Comando de Defesa Aeroespacial da América do Norte entrou em alerta máximo. Acontece que o radar confundiu o surgimento da Lua nos céus da Noruega com um disparo de mísseis. Até que o engano fosse esclarecido, o único dado que levantou dúvidas sobre a necessidade de reação foi o fato de que Khrushchev estava nos EUA, para participar de uma conferência da Organização das Nações Unidas. Não faria sentido os russos atacarem o país onde ele se encontrava.



Nikita Khrushchev

24 | 01 | 1961

Duas bombas atômicas Mark 39 foram lançadas sobre a cidade de Goldsboro, na Carolina do Norte, em 24 de janeiro de 1961. Elas tinham 3 e 4 megatons – somadas, eram 350 vezes mais poderosas do que a Fat Man que arrasou Nagasaki, em 1945. Não foi um ataque inimigo: um bombardeiro estratégico, Boeing B-52 Stratofortress, fazia um voo de rotina quando um vazamento de combustível provocou uma explosão no ar, 2.700 metros acima do solo. Havia oito pessoas dentro dele. Duas delas morreram antes de conseguir deixar a aeronave e uma faleceu depois de pular. As bombas foram ejetadas e lançadas para o chão com a queda amortecida por paraquedas de 30 m de diâmetro. Em 2013, o governo americano liberou o acesso a documentos até então confidenciais a respeito do acidente. Eles atestam que uma das bombas arrebentou ao encontrar o solo e chegou muito perto de explodir: três dos quatro mecanismos de segurança foram desarmados. Não foi o único acidente grave envolvendo o bombardeiro B-52. Apesar de estar em operação desde 1952 e prosseguir na ativa até hoje, seus primeiros anos foram marcados por problemas técnicos.

10 | 01 | 1964

Em 10 de janeiro de 1964, outro avião despencou, desta vez nos arredores de Meyersdale, Pensilvânia. Também havia duas bombas nucleares a bordo, que caíram sem explodir.

Getty Images

1961

24 - 11

O escritório de um dos principais centros de inteligência militar americana durante a Guerra Fria, o Comando Estratégico por Ar, ficou subitamente desconectado em 24 de novembro de 1961. Poderia ser sinal de um ataque massivo dos soviéticos, já que, em tese, as linhas de comunicação eram independentes, de forma que a troca de informações entre os principais centros das Forças Aéreas dos EUA nunca fosse interrompida em todos os locais simultaneamente. Mas foi o que aconteceu: um problema nos equipamentos de uma central telefônica no Colorado deixou os principais centros de tomada de decisão sem notícias dos demais. Sem saber de nada disso, o Comando Estratégico por Ar posicionou seus mísseis balísticos intercontinentais, capazes de alcançar a União Soviética. Não se sabe quem decidiu esperar para apertar o botão, mas a pessoa tomou a decisão correta: em minutos a comunicação foi restabelecida.

Fragata soviética atravessa o Atlântico a caminho de Cuba.

1962

27 - 10

O dia em que o mundo esteve mais perto do inverno nuclear foi 27 de outubro de 1962. Três incidentes diferentes, todos de alto nível de tensão, aconteceram num prazo de poucas horas. Um avião U-2 de espionagem americano foi derrubado enquanto sobrevoava Cuba. Outro entrou 480 quilômetros dentro do espaço aéreo soviético, sobre a península de Chukotka, no extremo leste da Rússia. Foi perseguido por dois caças MiG soviéticos, que tinham por objetivo escoltar a nave de volta para águas internacionais. Ao saber que uma aeronave americana estava cercada, o comando militar mandou dois caças para dar combate. Os F-102A estavam ambos armados com mísseis nucleares e dispostos a dispará-los, mas o U-2 deixou o espaço aéreo soviético antes que um confronto acontecesse. Mas o incidente mais grave foi outro: o mundo observava, aterrorizado, a crise dos mísseis. Em reação à instalação de armas americanas de longo alcance na Turquia, a União Soviética resolveu enviar seu arsenal nuclear para Cuba. A esquadra soviética que transportava o arsenal foi bloqueada no Oceano Atlântico por navios americanos. Enquanto o presidente americano John Kennedy e o líder soviético Nikita Khrushchev negociavam, um dos submarinos russos B-59 estacionados no Atlântico mergulhou para dificultar um possível ataque americano. Quando o destróier USS Beale disparou cargas de profundidade na direção do B-59, para forçá-lo a subir à superfície, o comandante russo Valentin Savitsky resolveu disparar um torpedo nuclear de 10 kilotons. Mas os três comandantes da embarcação soviética precisavam concordar com o disparo. Um deles, Vasili Arkhipov, convenceu Savitsky a subir à superfície sem disparar. Assim, salvou o mundo.

Getty Images

27 - 11 - 1962

No auge da crise dos mísseis, o militar russo Oleg Penkovsky, que agia como espião para os Estados Unidos, seguiu um procedimento previamente combinado para o caso de a União Soviética iniciar um ataque nuclear contra território americano: ligou para a embaixada do Reino Unido em Moscou, respirou três vezes e desligou, sem falar nada. Um minuto depois, repetiu o procedimento. Era o sinal necessário para os britânicos e americanos iniciarem a reação. Na verdade, o coronel Penkovsky havia sido preso pelos russos, que descobriram seus códigos e fizeram os telefonemas para a embaixada. Foi exatamente isso que os oficiais do escritório britânico em Moscou imaginaram que houvesse acontecido. Por isso, não levaram o alerta adiante. Penkovsky, que havia avisado os ingleses a respeito da intenção soviética de enviar mísseis a Cuba, foi condenado por traição e executado poucos meses depois, em maio de 1963.

O espião Penkovsky se defende dias antes de morrer executado.

23 - 05 - 1967

Se, em 1960, os americanos quase iniciaram a Terceira Guerra Mundial por causa da Lua, sete anos depois o problema foi uma tempestade solar. Ao perceber que o sistema de comunicação na região do Alasca e da Groenlândia estava sofrendo interferências, oficiais instalados na sede do Comando Estratégico do Ar, em Omaha, começaram a buscar uma explicação natural. Se não houvesse uma, só poderia ser uma ação militar soviética, que demandaria uma resposta imediata. Mas os analistas trabalharam bem: em menos de dez minutos, identificaram que a pane era resultado do bombardeio de partículas vindas do Sol e que provocaram distúrbios magnéticos capazes de interromper as comunicações. Mas foram minutos muito tensos. Essa história foi mantida em segredo até 2016, quando finalmente veio a público em um estudo produzido pela Universidade do Colorado.

Getty Images

09 – 11 – 1979

Policiais de Little Rock se organizam para patrulhar a região após o acidente na cidade vizinha.

Com muita frequência, os computadores do Comando de Defesa Aeroespacial da América do Norte entravam em pane, ou simplesmente disparavam alertas falsos. Por isso, boa parte dos avisos era submetida a uma rechecagem. Mas, em novembro de 1979, o alerta parecia detalhado demais, e assustador demais, para ser um simples erro: tudo indicava que 250 mísseis balísticos haviam sido lançados em direção aos Estados Unidos. Pouco depois, a estimativa foi ampliada: agora eram 2.200 mísseis disparados. O país tinha de três a sete minutos para iniciar uma retaliação antes de ser atingido e perder parte considerável de sua capacidade de reação. Enquanto os bombardeiros eram carregados e posicionados para partir, o sistema de satélites era acionado para confirmar o alerta. Na verdade, tudo não passava de um cenário de testes, enviado por engano para o sistema central de computadores do comando. Uma tragédia só foi evitada porque os radares não confirmaram a informação.

Eram 18h30 quando dois técnicos faziam pequenos reparos no topo de um míssil balístico intercontinental Titan II dentro de uma instalação militar na vila de Damascus, no Estado americano do Arkansas. Às 15h do dia seguinte, uma explosão arremessou o míssil para o alto e a ogiva nuclear foi cair a 30 metros de distância. O motivo do acidente foi assustadoramente banal: um dos técnicos, Dave Powell, de 21 anos, manejava (usando luvas) uma ferramenta de 3,6 quilos quando a derrubou. A peça caiu por 24 metros e, ao chegar ao chão, ricocheteou e atingiu a base do míssil, abrindo um furo por onde começou a vazar combustível. Não havia um procedimento padrão a ser adotado nesses casos. Depois de horas de vazamento, o míssil, de 31,3 m de comprimento, acabou explodindo e arrebentando a porta de 740 toneladas. Na época, o Titan II era uma das mais imponentes armas nucleares do país. A ogiva que ele carregava era 594 vezes mais poderosa do que a bomba que arrasou Hiroshima. Se tivesse sido detonada, poderia ter varrido boa parte do estado do mapa – e levado consigo o governador (e futuro presidente) Bill Clinton, que discursava em Little Rock, a 80 km do local. As Forças Armadas não se deram ao trabalho de reconstruir a instalação: ela foi coberta por terra e concreto e simplesmente abandonada. O acidente provocou a morte de um funcionário, David Livingston, e deixou 21 feridos. Em 1982, o presidente Ronald Reagan decretou a aposentadoria dos Titan II.

1980

Getty Images

Está estranhando a quantidade de histórias envolvendo os americanos, em detrimento dos poucos casos em que os russos é que quase iniciaram a guerra? O motivo é simples: os Estados Unidos vêm liberando, com o passar dos anos, documentos sobre os bastidores da guerra fria, enquanto os russos são muito menos transparentes. Ainda assim, os dois casos mais recentes desta lista envolvem a União Soviética. No primeiro deles, em 26 de setembro de 1985, o planeta foi salvo pelo tenente-coronel Stanislav Petrov.
Ele tinha todos os motivos para informar seus superiores a respeito de um ataque americano – era exatamente isso o que aparecia no monitoramento a que ele tinha acesso naquele dia. Se não agiu, é porque contou com o instinto: o sistema de alerta informava que cinco mísseis haviam sido disparados e seguiam na direção da União Soviética. O militar desconfiou que o equipamento estivesse com defeito, por um motivo simples: se os Estados Unidos fossem atacar, ele pensou, não seria com míseros cinco mísseis. Decidiu então esperar, mesmo sabendo que a escalada de ameaças de ambos os lados vinha aumentando rapidamente. Petrov manteve a calma. Minutos depois, para alívio do técnico, o alerta desapareceu de sua tela.

26 - 09 - 1983

O último episódio de tensão também teve a Rússia como cenário, anos depois do fim da União Soviética. O presidente russo Boris Yeltsin recebeu a informação de que um foguete norueguês havia sido disparado. Colocou submarinos capazes de lançar mísseis nucleares em alerta máximo e recebeu a Cheget, a maleta que seria utilizada para ordenar a retaliação. Minutos depois, o presidente desistiu, quando ficou claro que o disparo não tinha alvos militares; na verdade, o foguete tinha objetivos científicos. A Rússia havia sido informada com antecedência a respeito da ação da Noruega. Mas o aviso se perdeu na vasta burocracia interna do país e não alcançou os postos mais altos da cadeia de comando. Por pouco, Yeltsin não atacou a Europa, logo num momento em que ninguém mais esperava que o planeta pudesse testemunhar uma hecatombe nuclear.

25 - 01 - 1995

Getty Images

27

O FIM ESTÁ PRÓXIMO?

Cientistas monitoram os riscos de extinção da humanidade.

Neste momento, faltam dois minutos para a meia-noite. Em 2012, faltavam cinco minutos. Em 1991, 17; em 1947, sete. É assim, usando a metáfora de um relógio, que o Boletim dos Cientistas Atômicos, lançado em 1945 por pesquisadores da Universidade de Chicago, avalia qual é o risco de o planeta mergulhar no inverno nuclear – expressão utilizada para fazer referência a um cenário em que o mundo esteja coberto por poeira radioativa, levantada por uma série de explosões nucleares espalhadas pelo globo. Em sete décadas de contagem do Relógio do Fim do Mundo, o ponto mais grave, 23h58, foi registrado apenas três vezes, em 1953, 2018 e 2019. Nos últimos dois anos, a organização acrescentou o aquecimento global como um fator decisivo para aproximar nossa espécie da extinção. Mas insiste nos riscos provocados pela falta de controle sobre o arsenal nuclear planetário. "Os EUA abandonaram o acordo nuclear com o Irã e o dilema nuclear da Coreia do Norte continua sem solução", diz o relatório deste ano.

Míssil com ogiva nuclear disparado pela Coreia do Norte.

ÁTOMOS QUE MATAM

A ENERGIA NUCLEAR E OS SUBMARINOS DE GUERRA PROVARAM SER UMA COMBINAÇÃO LETAL (E IRRESISTÍVEL) PARA FINS MILITARES.

O PERIGO VEM DO MAR

POR **VICTOR BIANCHIN**

Um U-Boat sobe à tona: o submarino alemão dominou os mares até 1943.

DURANTE A SEGUNDA GUERRA MUNDIAL, uma das providências adotadas por Hitler foi reativar a produção dos U-boats, submarinos que haviam entrado em linha na Primeira Guerra. Eram armas estratégicas para o Terceiro Reich porque usavam técnicas de matilha: circundavam os alvos (navios e comboios) e atacavam juntos. Entre 1939 e 1943, quase 5 mil embarcações foram afundadas assim.

Ótimo para o *Führer*, péssimo para os tripulantes dos U-boats, que não tinham vida fácil. Os submarinos da época eram movidos por uma mistura de motor a diesel (igual ao dos navios) e baterias elétricas. Na superfície, usava-se o motor. Quando o veículo submergia, porém, não havia o oxigênio necessário para a combustão e nem uma forma de ventilar os gases emitidos. Portanto, era preciso usar as baterias, que duravam apenas algumas horas. Por isso, a estratégia era ficar emerso o maior tempo possível à procura de alvos e só submergir na hora da ação - um risco em tempos de guerra.

Quando os Aliados aprenderam a lidar com a ameaça dos U-boats, a reação foi rápida: a partir de 1943 e até o fim da guerra, os submarinos nazistas foram destruídos às centenas. Para cada dez U-boats que deixavam os portos, sete nunca retornavam.

Mas, depois da guerra, a energia nuclear promoveu uma revolução para os submarinos, porque eliminava as inconveniências causadas pela combustão do diesel e pela vida curta das baterias. As únicas limitações eram as de suporte humano, ou seja, os estoques de comida, água e ar para a tripulação. Finalmente um submarino poderia dar a volta ao mundo sem nunca vir à superfície.

KRAKEN MODERNO

Os modelos mais avançados de submarinos nucleares hoje são os da classe Seawolf, desenvolvida nos EUA. Projetada nos anos 1980, ela deveria ser composta de 29 veículos, mas limitações orçamentárias (cada unidade custa US$ 3 bilhões) e o fim da Guerra Fria fizeram com que o orçamento fosse diminuído e apenas três submarinos fossem construídos, todos em atividade hoje. São eles: o Seawolf (SSN-21), o Connecticut (SSN-22) e o Jimmy Carter (SSN-23). "SSN" não é uma sigla, e sim um código que significa duas coisas: que é movido a energia nuclear e que é um submarino de ataque.

São mais de 8 mil toneladas encobertas por um casco de aço capaz de suportar 100.000 psi (ou 6.800 atm) de pressão. No coração de tudo está um reator nuclear do tipo S6W com 52 mil cavalos de potência, capaz de fazer o veículo andar a 25 nós (37 km/h) enquanto submerso. Ele se estende por dois terços do comprimento do submarino, enquanto a parte da frente contém os quartos da tripulação (cabem 130 homens no Seawolf) e os espaços de armazenamento dos mísseis.

No meio do submarino fica a sala de controle, mas não é só de lá que o veículo pode ser operado: ao todo, espalhados pelo veículo, há 44 terminais multifunção conectados ao mesmo computador central. O capitão consegue controlar o submarino pelo seu laptop no quarto se quiser.

Mas o grande diferencial do Seawolf é seu poderio ofensivo. Ele possui oito tubos para o lançamento de torpedos e pode carregar até 50 deles – o Los Angeles, classe anterior de submarinos de guerra, só carregava 17. O sistema de recarregamento dos tubos é automático, permitindo ataques rápidos em sucessão. Um único Seawolf seria capaz de causar a mesma destruição que três Los Angeles juntos.

Toda essa tática resultou em um veículo versátil, capaz de prestar suporte a navios porta-aviões, atuar em grupos de ataque e realizar destruição em terra com seus Tomahawk. E, graças à energia nuclear, ele pode fazer tudo isso de forma discreta, agindo a partir do leito do oceano.

Getty Images

REAÇÃO EM CADEIA

Projetos (nem sempre executados) de outros veículos movidos a energia nuclear.

Ford Nucleon
Seria movido a vapor fornecido pela fissão de urânio. Mas o "carro nuclear" nunca saiu do protótipo.

WS-125
Desenvolvido nos anos 1950, o avião americano seria utilizado para bombardeios nucleares. Depois de dois motores serem testados com sucesso, o projeto foi desativado devido ao alto custo.

Dirigível avançado
Francis Morse, ex-engenheiro da Goodyear, criou o protótipo mais famoso, um "hotel voador" com 300 m de comprimento, propulsor nuclear de 6 mil cavalos e capacidade para 400 pessoas.

NS Savannah
O primeiro navio mercante movido a energia nuclear é um dos quatro navios de carga desse tipo que já existiram. Ativo de 1962 a 1972.

Navios quebra-gelo
Não é qualquer embarcação que supera a camada de gelo de até 2 m de espessura do Mar do Norte no inverno. Os russos resolveram o problema desenvolvendo embarcações movidas por reatores nucleares. Algumas são utilizadas como navios de cruzeiro.

ARSENAL DO SÉCULO 21

POR **VICTOR BIANCHIN**

A NOVA CORRIDA ARMAMENTISTA DÁ ORIGEM A ARMAS CAPAZES DE TRANSPORTAR E DETONAR OGIVAS NUCLEARES ATÉ MESMO EMBAIXO D'ÁGUA.

QUASE TRÊS DÉCADAS DEPOIS DO FIM DA GUERRA FRIA, A RÚSSIA ESTÁ CERCADA. Se em 1991, quando a União Soviética acabou, a Organização do Tratado do Atlântico Norte (OTAN) tinha 17 países membros, agora são 29, e 11 dos novos sócios são ex-aliados dos russos. A maior parte dessas nações é alinhada aos EUA, que vêm estimulando a organização a crescer em número de integrantes e também no orçamento militar, que deve alcançar US$ 1 trilhão em 2019. Enquanto tantos europeus se reúnem contra a Rússia, Moscou reage construindo novas e impressionantes armas.

Em dezembro de 2018, os russos apresentaram o míssil hipersônico Avangard, capaz de viajar a 20 vezes a velocidade do som e desviar de obstáculos em seu trajeto para o alvo - e tudo isso planando, sem a necessidade de sair da atmosfera e reentrar para ganhar velocidade. O país também já testou drones submarinos com o poder de interceptar ou cortar comunicações. E desenvolveu o míssil R-28 Sarmat, um colosso de 208 toneladas e 35,5 m de comprimento, com espaço para carregar dezenas de ogivas nucleares. Também vem testando o míssil Petrel, capaz de permanecer voando, indefinidamente, alimentado por um reator nuclear embarcado. Mas nenhum lançamento supera a capacidade de provocar terror do Poseidon.

Desenvolvido em 2015, ele é um veículo submarino não tripulado, que pode lançar ogivas de, estima-se, até 100 megatons. Detonado debaixo da água, na costa de uma metrópole, tem o poder de criar um tsunâmi com ondas de 500 m de altura. Bastaria um único Poseidon para destruir Nova York inteira, por exemplo.

ADEUS, FAT MAN

Novo arsenal nuclear é muito mais potente e preciso do que as armas que apavoraram o mundo na segunda metade do século 20.

Hwasong-15

Origem: Coreia do Norte
Alcance: 13.000 km
Velocidade: 1.000 km/h
Diferencial: Alcançar os EUA.

B61-12

Origem: EUA
Alcance: 500 km
Velocidade: 800 km/h
Diferencial: Atingir com precisão.

NOVA ERA

Quando se trata de armas nucleares, os americanos avançam de forma mais lenta. A maior novidade por lá são as bombas B61-12, variantes mais recentes da família B-61, que existe desde os anos 1960. Assim como suas antecessoras, são bombas de gravidade (ou seja, precisam ser jogadas de aviões), com a diferença de que podem ser guiadas para atingir os alvos com altíssima precisão.

Também estão na lista de inovações as ogivas W76-2 de baixo rendimento (5 a 7 kilotons) para mísseis Trident II e um novo míssil de cruzeiro lançado do solo. O principal objetivo dos EUA, neste momento, é desenvolver equipamentos capazes de despachar as armas nucleares já existentes com a maior precisão possível, para qualquer canto do planeta, driblando as defesas inimigas.

Já a China vem ampliando os investimentos. O país, que tem dedicado US$ 175 bilhões por ano ao orçamento militar, passou a ter submarinos nucleares e mísseis balísticos intercontinentais. Destaque para o Dongfeng-41, capaz de ultrapassar a velocidade de 30 mil km/h e viajar por até 15 mil km em direção ao alvo, o que permitiria atingir o território americano. Aliás, a Coreia do Norte também desenvolveu um míssil capaz de chegar aos EUA, o Hwasong-15 *(veja no quadro abaixo)*.

Em tese, existe um limite racional para o uso de bombas. Um estudo de 2018 assinado por Joshua Pearce, professor da Michigan Technological University, e por David Denkenberger, professor assistente da Tennessee State University, estima que o máximo de armas nucleares que uma nação pode usar sem prejudicar a si é de apenas 100. Mais que isso e está suscetível a matar seu próprio povo devido à ruptura das cadeias de fornecimento e às mudanças climáticas causadas pelas bombas. Tudo indica que, nos próximos anos, esse limite racional vai ser desafiado.

Diante da escalada, Washingon acusou os russos de romper os termos do Tratado de Forças Nucleares de Alcance Intermediário (INF), que limitava a proliferação de armas de médio alcance. Os dois países abandonaram o acordo, firmado em 1987 e que nunca havia sido assinado pela China.

É provável que ambos se recusem a renovar o New Start, que expira em 2021 e limita o número de ogivas nucleares prontas para uso. Sinal de que o acordo não verbal de destruição mútua assegurada, que pressupunha que nenhum país usaria armas nucleares temendo ser alvo na sequência, não está mais em vigor.

ERRO HUMANO

Recentemente, um míssil de cruzeiro alimentado pelo próprio reator explodiu.

Como tudo o que envolve a indústria nuclear dos russos, um incidente recente ficou envolto em mistério: em agosto de 2019, sete pessoas morreram na região de Arkhangelsk, ao norte do país, depois de um acidente nuclear. A região chegou a ser evacuada, mas depois o governo voltou atrás. Ao longo dos dias, depois de muitas notas oficiais contraditórias, ficou mais claro o que aconteceu: um míssil de cruzeiro Petrel, alimentado pelo próprio reator nuclear, explodiu durante a realização de um teste numa plataforma em alto-mar. O acidente liberou radiação, mas não se sabe quantas pessoas foram prejudicadas.

O Avangard

Origem: Rússia
Alcance: 6.000 km
Velocidade: 24.000 km/h
Diferencial: Planar até o alvo.

O Poseidon

Origem: Rússia
Alcance: 10.000 km
Velocidade: 185 km/h
Diferencial: Criar tsunâmis.

Divulgação, Reprodução, Getty Images

ARMAS DA ATUALIDADE

A BOMBA BRASILEIRA

ELA EXISTE, NO PAPEL. CONHEÇA A HISTÓRIA DO PESQUISADOR BRASILEIRO QUE PROVOCOU UM INCIDENTE DIPLOMÁTICO AO DESENHAR, EM DETALHES, UM ARTEFATO NUCLEAR EM SUA TESE DE DOUTORADO.

POR **TIAGO CORDEIRO**

NÃO É NECESSÁRIO CRIAR UMA BOMBA NUCLEAR, mas é estratégico conhecer a receita. Foi pensando assim que o físico brasileiro Dalton Ellery Girão Barroso publicou uma tese de doutorado tão explosiva que permanece sob sigilo pelo Instituto Militar de Engenharia (IME) do Exército. O acesso ao texto, apresentado em 2006 com o nome *Simulação Numérica de Detonações Termonucleares em Meios Híbridos de Fissão-fusão Implodidos pela Radiação*, não é permitido ao público. Procurados, tanto o IME quanto o pesquisador confirmaram que o acesso à tese é restrito a pesquisadores previamente autorizados.

A parte não sigilosa da pesquisa foi utilizada como ponto de partida para a publicação, em 2009, de um livro de 174 páginas chamado *A Física dos Explosivos Nucleares*. Trata-se de uma obra técnica, escrita para especialistas, focada na reciclagem de reatores de geração de energia modelo PWR, os mais utilizados no mundo *(mais sobre eles na página 36)*. O livro não incluiu a parte polêmica da tese original: a descrição do funcionamento de uma ogiva nuclear semelhante à W87 americana.

Na época, o Brasil foi pressionado, pela Agência Internacional de Energia Atômica (AEIA), a censurar a distribuição do livro. Em visita à Inglaterra na mesma época, o então presidente Luís Inácio Lula da Silva foi questionado pelo então primeiro-ministro Gordon Brown sobre as intenções tanto do Brasil quanto do pesquisador. Depois de semanas de negociações tensas envolvendo o chanceler Celso Amorim e o ministro da Defesa Nelson Jobim, o governo decidiu não impedir o lançamento do livro.

"ABRIR MÃO DE POSSUIR ARMAS NUCLEARES É UMA COISA. ABRIR MÃO DO CONHECIMENTO E DA CAPACIDADE DE DESENVOLVÊ-LAS É OUTRA COISA COMPLETAMENTE DIFERENTE."

CUSTO ALTO

"Abrir mão de possuir armas nucleares é uma coisa. Abrir mão do conhecimento e da capacidade de desenvolvê-las é outra coisa completamente diferente", explica Dalton Barroso, em entrevista à SUPER. O pesquisador e professor do IME estuda o assunto há mais de 35 anos.

Por que o Brasil não tem bombas nucleares? Além de ter se comprometido, ao assinar o Tratado de Não-Proliferação Nuclear (TNP), a não se envolver na produção de armamentos nucleares - o acordo impede que novos países desenvolvam armas atômicas, mantendo assim a situação atual -, existe também uma dificuldade orçamentária. "Essa tecnologia demanda muito dinheiro, por ser muito sofisticada, o que, de certo modo, faz com que poucos governos invistam recursos com essa finalidade", explica Ítalo Curcio, professor da Universidade Presbiteriana

Divulgação

Mackenzie. "O Brasil possui a matéria-prima básica, urânio, em abundância. Porém, para enriquecer esse urânio e obter o isótopo 235 na proporção necessária para a produção de uma bomba atômica, é preciso realizar um gasto muito alto." O dinheiro poderia ser um problema, mas não faltaria capacidade: o Brasil domina o enriquecimento de urânio e chegou inclusive a desenvolver uma tecnologia própria.

Para Matias Spektor, professor associado e vice-diretor da Escola de Relações Internacionais da Fundação Getúlio Vargas, autor do livro *As Origens da Cooperação Nuclear entre Brasil e Argentina*, as consequências de um projeto militar envolvendo urânio enriquecido seriam terríveis. "Se um país da América Latina construísse um explosivo nuclear, o efeito seria péssimo no sentido de criar um ambiente de profunda insegurança." Do ponto de vista do professor, uma corrida armamentista entre os vizinhos latino-americanos poderia levar a uma guerra nuclear sem limites. Quem discorda costuma apontar que deter armas atômicas reduziria os riscos de ataques inimigos. É a estratégia adotada por Irã e Coreia do Norte, por exemplo.

Desde o final dos anos 1970, o Brasil manteve diferentes programas nucleares, todos secretos. Henrique Saboia, ministro da Marinha do governo de João Figueiredo (1979-1985), conduziu um programa de enriquecimento de urânio em Iperó (SP). Na época, Brasil e Argentina se envolveram em uma corrida armamentista secreta, que se estendeu até o final dos anos 1980.

O programa brasileiro incluiu a concessão de 700 bolsas, que formaram centenas de especialistas em pesquisa nuclear. Em 1990, o presidente Fernando Collor de Mello mandou fechar o Campo de Provas Brigadeiro Velloso, na Serra do Cachimbo (PA). Dentro da área de 22 mil metros quadrados, havia uma série de instalações, incluindo dois buracos com 270 metros de profundidade e 6 de diâmetro.

A Aeronáutica utilizava o local desde 1981, e nunca explicou direito por que precisava dos buracos – chegou a alegar que eles seriam usados para armazenar resíduos radioativos, mas a suspeita que pairou no ar, na época, nunca mais se dissipou: tudo indica que ali eram construídos e testados equipamentos e componentes utilizados para construir bombas atômicas.

Em 1998, o presidente Fernando Henrique Cardoso assinou o TNP. Desde então, oficialmente, o Brasil não mantém nenhum projeto que envolva a produção de artefatos nucleares. Mas o país ainda pretende ter submarinos de propulsão nuclear inteiramente nacionais. A previsão da Marinha é realizar a primeira entrega de veículos em 2029.

"O BRASIL NÃO PODE FICAR ALHEIO AO ASSUNTO"

Dalton Barroso explica como desenhou um artefato nuclear.

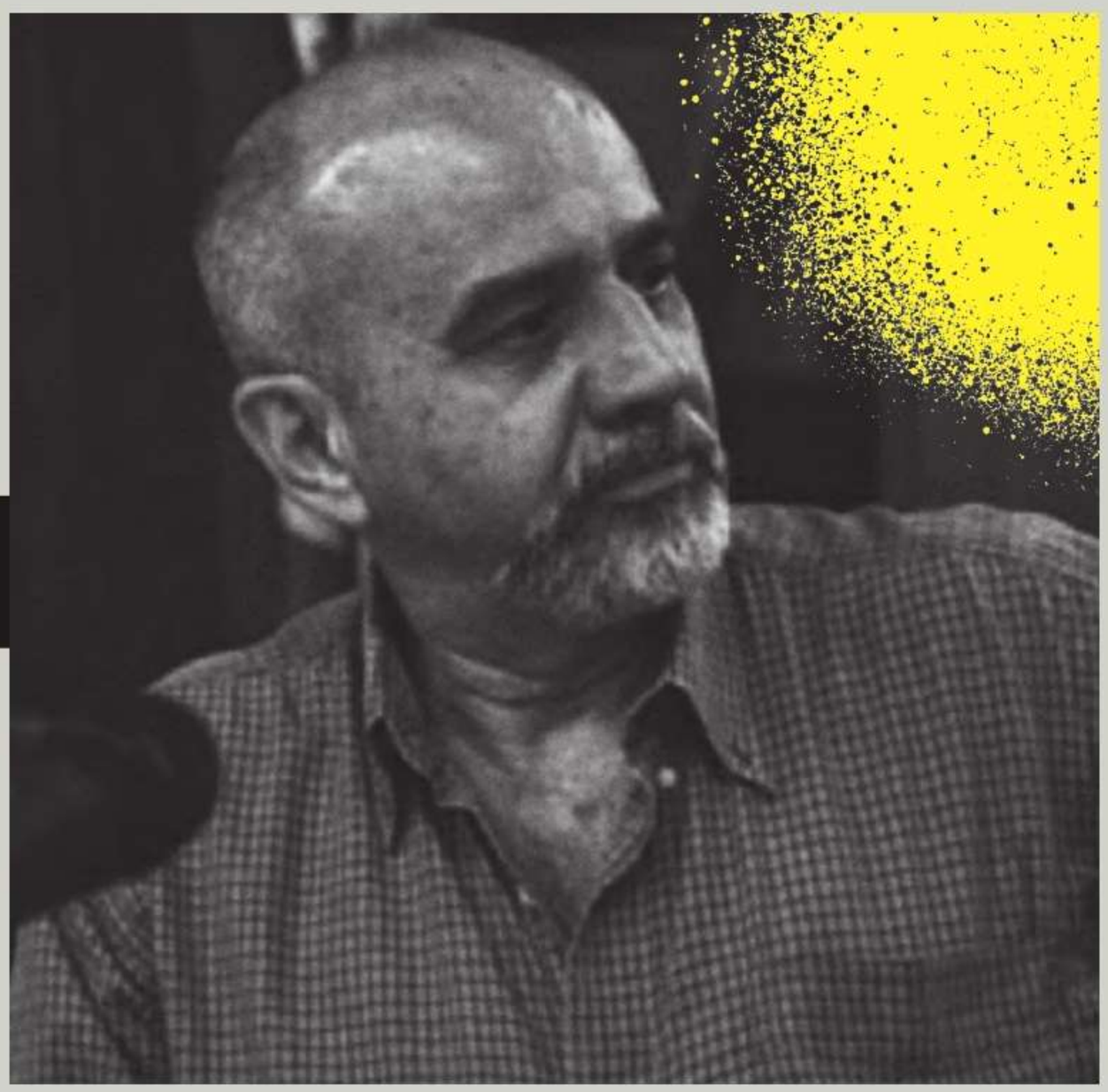
COMO O SENHOR COMEÇOU SUA PESQUISA SOBRE EXPLOSIVOS NUCLEARES?

O estudo dos explosivos nucleares envolve um conjunto muito grande de áreas multidisciplinares, a maior parte das quais é matéria comum a outros ramos da atividade científica aberta, não necessariamente ligada ao desenvolvimento de explosivos nucleares. Não foi à toa que o famoso cientista e dissidente russo Andrei Sakharov, um dos pais do explosivo termonuclear russo, afirmou que "o estudo dos explosivos nucleares é um paraíso para os teóricos". Foi essa gama de disciplinas tão diversificadas que me atraiu para o tema. Na verdade, comecei a estudar o assunto alguns anos após o início da minha carreira. Foram atividades de pesquisa estritamente acadêmicas, visando à aquisição de conhecimento, e não à eventual produção de armas nucleares, já que não há no país direcionamento nesse sentido. No entanto, a guerra nuclear tem consequências globais, e o Brasil não pode ficar alheio ao assunto.

COMO O SENHOR ALCANÇOU OS RESULTADOS APRESENTADOS EM SUA TESE DE DOUTORADO?

Já há bastante tempo eu vinha acompanhando os trabalhos sobre fusão por confinamento inercial, matéria em parte desclassificada [que teve o sigilo levantado] a partir da década de 1970 e que estuda a produção de energia da fusão por meio de microexplosões termonucleares de esferas de deutério-trítio (DT), altamente comprimidas, utilizando feixes de raios laser ou de partículas carregadas. Embora inicialmente com motivações militares (para simular em laboratório as condições existentes nas detonações termonucleares), a produção

Divulgação



“QUALQUER PAÍS, COM UM MÍNIMO DE ESTRUTURA CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA, TEM CONDIÇÕES DE DESENVOLVER ARMAS NUCLEARES.”

de energia por meio de microexplosões termonucleares tem sido considerada como séria alternativa à produção de energia mediante a fusão por confinamento magnético. Portanto, eu estava bastante familiarizado com esse tema, que tem tudo a ver com o que ocorre nos explosivos termonucleares, dada a semelhança entre os processos envolvidos. De modo que não foi difícil para mim definir quais processos físicos deveriam ser levados em conta na simulação computacional de uma explosão termonuclear, nem que modelos e equações deveriam ser utilizados. A minha tese foi desenvolvida com relativa facilidade, tive apenas que adaptar os softwares que já haviam sido desenvolvidos por mim para estudar casos específicos propostos na tese.

A COMPARAÇÃO DE SUA ANÁLISE COM A OGIVA AMERICANA W87 (QUE TERIA INSPIRADO A ANÁLISE DO PROFESSOR) **PROCEDE?**

▲ É difícil dizer, porque não conheço qual a configuração exata da W87, já que detalhes internos sobre bombas atômicas (com exceção das de Hiroshima e Nagasaki) são totalmente classificados. Baseei-me apenas numa figura esquemática da W87, publicada primeiramente numa revista americana (inadvertidamente, ao que consta), e, posteriormente, num relatório do Congresso Americano (Relatório Cox), contendo resultados de investigações sobre espionagem, por parte da China, em laboratórios nucleares dos Estados Unidos. Devo dizer que o objetivo principal da minha tese não era simular exatamente a W87, mas configurações semelhantes baseadas nas indicações dessa figura.

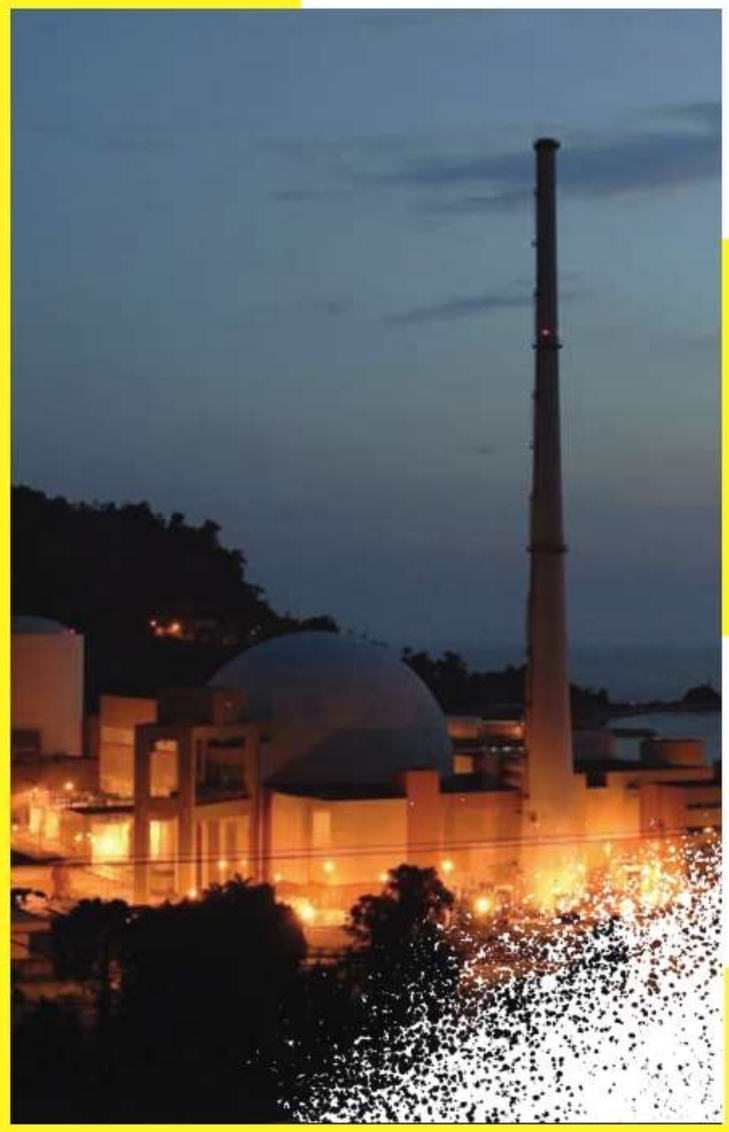
O BRASIL TEM CONDIÇÕES DE DESENVOLVER ARTEFATOS MILITARES ATÔMICOS? DEVERIA?

▲ Qualquer país, com um mínimo de estrutura científica e tecnológica, tem condições de desenvolver armas nucleares desde que haja decisão política para tal. O Brasil tem tido um razoável desenvolvimento científico e tecnológico na área nuclear, desde a época do acordo com a Alemanha, na década de 1970 [firmado em 1975, o tratado previa a compra de equipamentos alemães para construir oito reatores]. Dominamos uma importante tecnologia, que é a do enriquecimento do urânio, mas não temos um reator próprio que pudesse ser destinado à produção de plutônio adequado a fins militares, nem usinas de reproce ssamento do combustível irradiado do reator, etapas fundamentais para construir armas nucleares. De qualquer forma, o país já deu sinais de que não pretende desenvolver armamento nuclear. Entretanto, abrir mão de possuir armas nucleares é uma coisa. Abrir mão do conhecimento e da capacidade de desenvolvê-las é outra coisa completamente diferente. Ninguém tem bola de cristal para garantir que no futuro um país continental como o Brasil, riquíssimo em recursos naturais e dono da maior e mais cobiçada floresta tropical do mundo, ficará imune a aventuras bélicas contra a sua soberania e integridade territorial.

ENERGIA NUCLEAR

COMO SE QUEBRA UM ÁTOMO

Vista de longe, Angra 2, no Rio de Janeiro, parece uma indústria comum. Não é.



INDIVISÍVEL. INDESTRUTÍVEL. IMUTÁVEL. PARA OS FILÓSOFOS GREGOS, QUE CRIARAM A IDEIA DE ÁTOMO, NO SÉCULO 5 A.C., ELE ERA ASSIM. MAS A CIÊNCIA DESCOBRIU COMO IR ALÉM.

POR **TIAGO CORDEIRO**

OS EDIFÍCIOS TÍPICOS DE UMA USINA NUCLEAR TÊM DEZENAS DE METROS DE ALTURA. O de Angra 2, por exemplo, alcança 60 metros, o equivalente a um prédio de 20 andares. Toda essa estrutura existe, basicamente, para proteger algumas varetas de aproximadamente 4 metros de comprimento, que contêm cerca de 400 pastilhas cilíndricas de um centímetro de comprimento e de diâmetro cada uma. É a partir das reações nucleares ocorridas com o material dessas pastilhas que se aquece a água, a ponto de vaporizá-la para proporcionar o movimento da turbina que gerará a energia elétrica.

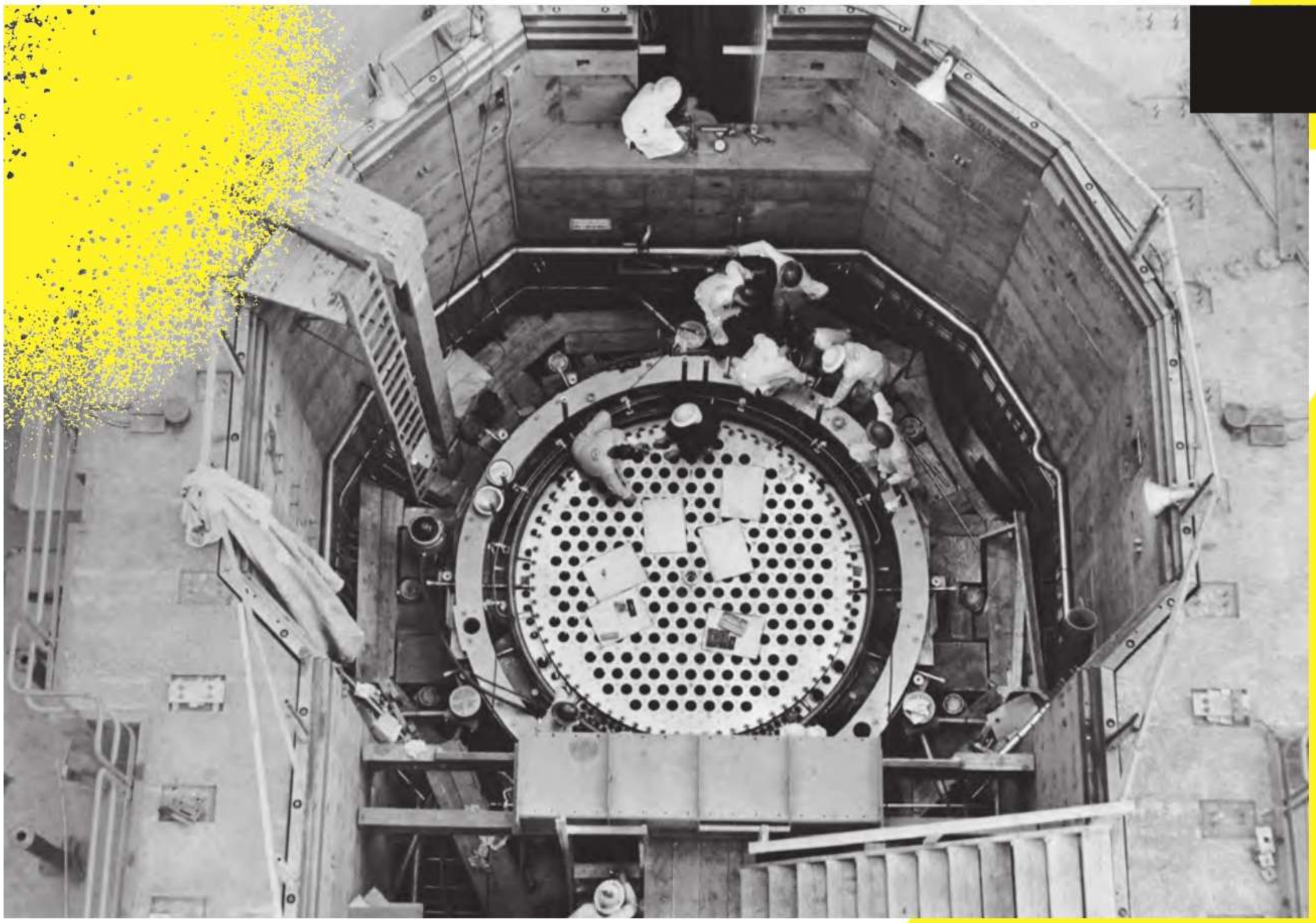
Feita de urânio, a pastilha é resultado de um processo industrial complicado. Na natureza, o urânio é encontrado dentro de rochas. Nas minas de extração, elas são trituradas e submetidas a um processo químico que resulta no chamado *yellowcake*, um pó com o mineral concentrado. Esse material precisa então ser processado para se obter o hexafluoreto de urânio no estado gasoso.

Esse processo o Brasil não domina o suficiente para atender à demanda interna: em geral nós extraímos a rocha, formamos o pó, enviamos para o exterior e recebemos de volta o gás. É só na forma de gás que o urânio pode ser enriquecido. Enriquecer urânio é basicamente aumentar a concentração dos átomos com o isótopo U-235. Na natureza, ele é encontrado em 0,7% das rochas. Uma usina nuclear precisa de 3% de concentração de U-235. Uma bomba, de mais de 90%.

Para transformar o urânio de sua forma mais comum, o U-238, na versão que tem o poder de se fissionar, o hexafluoreto de urânio passa por uma centrífuga. Conforme ela gira, separa o U-235, mais leve, do U-238, mais pesado. Quanto mais se repete o processo, mais concentrado de U-235 fica o material que, finalmente, é transformado na pastilha.

Quando estão prontas, as pastilhas são colocadas dentro das varetas feitas de uma liga de aço especial, o zircaloy. Dezenas dessas varetas formam feixes, que são posicionados dentro do núcleo do reator. Em geral, esses feixes são envolvidos por água, com profundidade de até 12 metros. É dentro do núcleo que a mágica acontece.

Getty Images



Visão de cima de um reator em construção no Canadá. As varetas de controle ficam instaladas nos pontos escuros.

SISTEMAS DE SEGURANÇA

Todo esse trabalho, da mina de urânio até o forno, tem um objetivo, em tese, muito simples: bombardear as pastilhas com nêutrons, de forma a romper os núcleos dos átomos de urânio. A quebra desses átomos produz mais nêutrons, que quebram mais átomos, e a reação continua sozinha.

A energia decorrente desse processo gera calor, que aquece água, cujo vapor movimenta uma turbina, que gera energia elétrica. A partir do momento em que a reação acontece, a sequência de ações não é tão diferente de uma usina termelétrica comum, movida a carvão: tudo se resume a transformar calor em eletricidade. No caso da usina nuclear, o diabo está nos detalhes.

Romper átomos de urânio resulta em muito mais calor, proporcionalmente, do que o obtido com a queima de carvão. Por outro lado, a fissão produz uma série de subprodutos radioativos, que têm de ser armazenados com cuidado - por dezenas, centenas ou até milhares de anos. Além disso, ao fim de três anos, 75% do urânio de uma pastilha desaparece, e ela precisa ser substituída.

O ciclo de bombardeamento com nêutrons, transformação de elementos químicos, geração de calor e emissão de radiação precisa ser controlado, de forma que mantenha a usina em funcionamento sem provocar um colapso. Para isso existem as varetas de controle e os moderadores, componentes fundamentais para garantir a segurança de qualquer usina.

As varetas ficam posicionadas em torno do núcleo, e podem ser lançadas para dentro dele sempre que necessário. São feitas de materiais que absorvem nêutrons, normalmente carboneto de boro, mas também ligas de prata, índio e cádmio. Ao entrar no núcleo, atrapalham a circulação dos nêutrons, desacelerando a fissão dos átomos.

Mas controlar a quantidade não basta: também é preciso regular a velocidade dos nêutrons porque, à medida que eles reagem, ganham velocidade e perdem a capacidade de fissionar átomos. Para isso entram em cena os moderadores, que atuam como freios. Os moderadores mais encontrados nas usinas são água, que pode ser comum (também chamada de leve) ou pesada (ou seja, formada por dois átomos de deutério e um de oxigênio). Existem usinas que utilizam o grafite – Chernobyl era uma delas.

Getty Images

MODELOS MAIS POPULARES

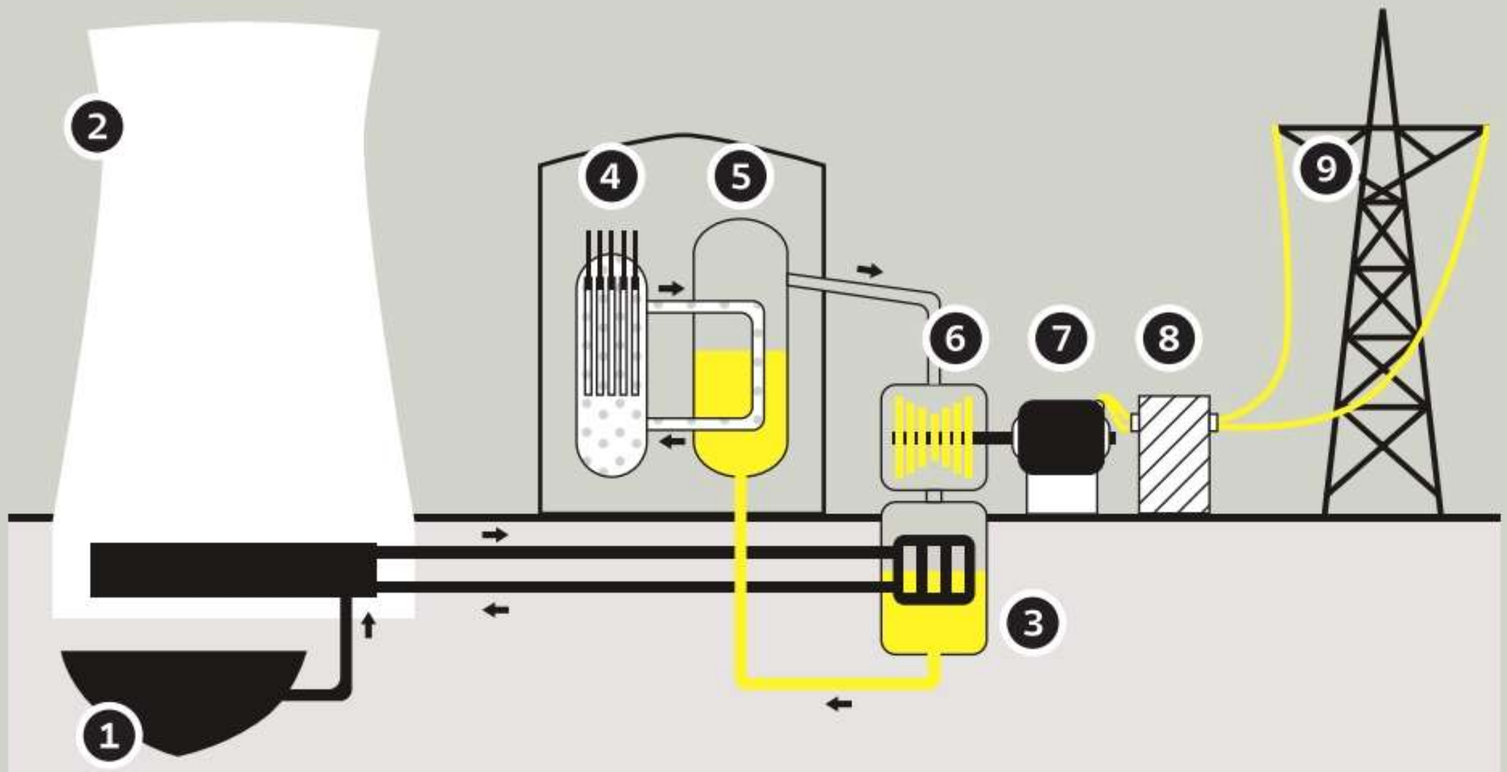
As diferenças entre os dois reatores mais comuns entre as décadas de 1940 e 1980.

PWR

PRESSURIZED WATER REACTOR
ou "reator de água pressurizada"
ORIGEM Estados Unidos, 1953
ONDE É UTILIZADO
Brasil, Estados Unidos, França, Japão, Rússia, China, entre outros
UNIDADES ATIVAS 298

VANTAGENS São tão seguras que se tornaram padrão de mercado para as maiores usinas do mundo.

DESVANTAGENS Para utilizar água a altas pressões, é preciso desenvolver tubulações muito mais resistentes – e caras. Além disso, essas tubulações se desgastam com o tempo, e trocá-las é complicado e exige a interrupção do funcionamento da usina.



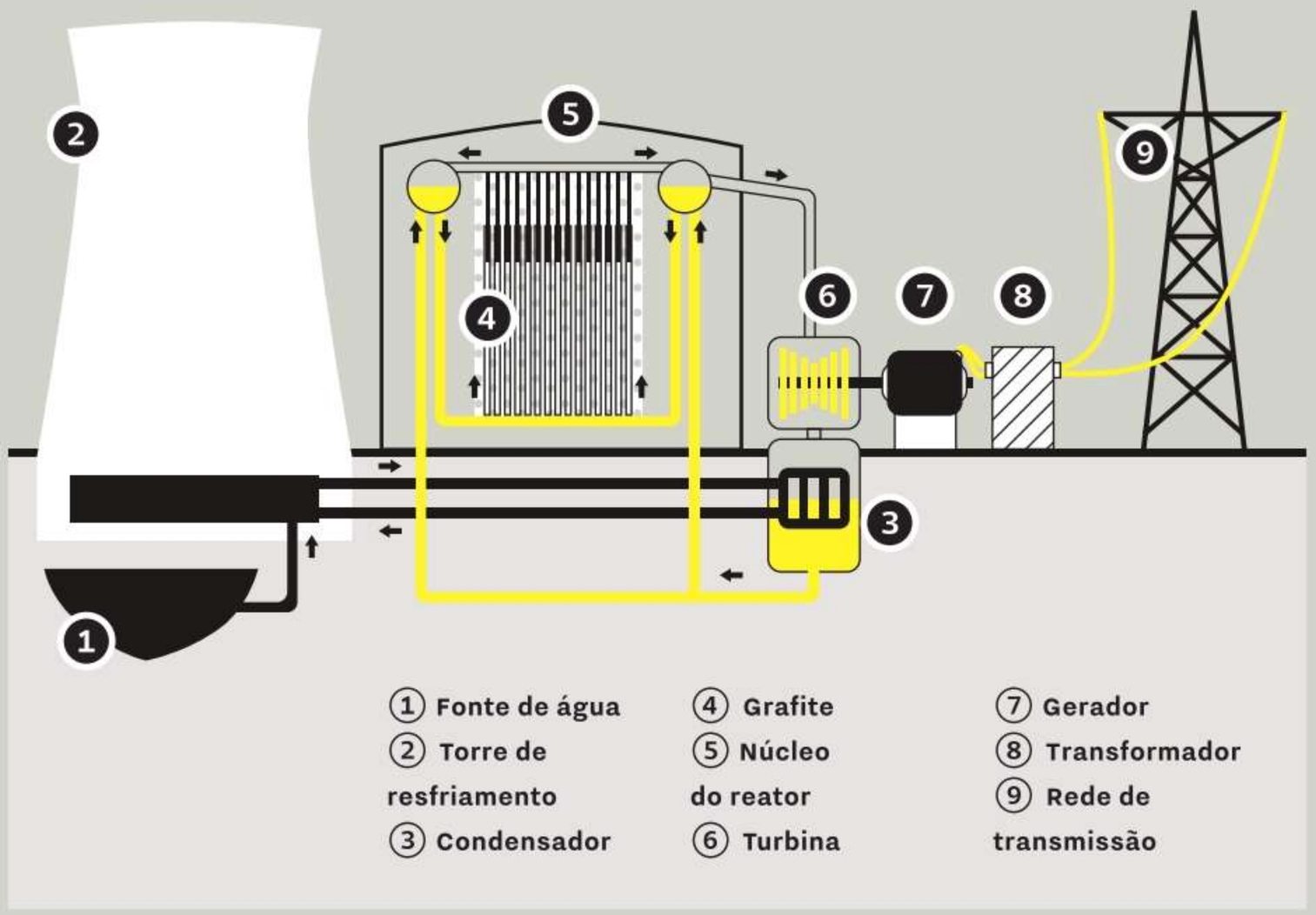
① Fonte de água
② Torre de resfriamento
③ Condensador
④ Núcleo do reator
⑤ Gerador a vapor
⑥ Turbina
⑦ Gerador
⑧ Transformador
⑨ Rede de transmissão

RBMK

REAKTOR BOLSHOY MOSHCHNOSTY KANALNYY
ou "reator canalizado de alta potência"
ORIGEM União Soviética, 1954
ONDE É UTILIZADO
Rússia
UNIDADES ATIVAS 10

VANTAGENS Basicamente, é um modelo mais barato para construir e mais fácil de operar.

DESVANTAGENS A água entra em contato direto com o reator, e se torna radioativa. Além disso, como Chernobyl comprovou, o grafite é um moderador muito mais instável do que a água.



① Fonte de água
② Torre de resfriamento
③ Condensador
④ Grafite
⑤ Núcleo do reator
⑥ Turbina
⑦ Gerador
⑧ Transformador
⑨ Rede de transmissão

PARA ONDE VAI O LIXO?

Ninguém jamais conseguiu responder direito a essa questão.

No início do desenvolvimento das usinas nucleares, era comum que os resíduos fossem simplesmente descartados na natureza – é o caso do complexo nuclear de Mayak, como você vai ler na reportagem que começa na página 50. Em quase todos os países que mantêm usinas nucleares, incluindo o Brasil, a Inglaterra e a Coreia do Sul, eles são mantidos em piscinas e em depósitos temporários. O ideal seria enterrar os resíduos, bem fundo, nos chamados depósitos geológicos, capazes de, na teoria, abrigar o material radioativo com segurança por milhares de anos. Mas não é fácil encontrar um lugar assim. A Alemanha está tentando, depois de desistir de utilizar uma mina de sal em Gorleben. Os Estados Unidos chegaram a uma solução: a montanha Yucca, no deserto de Nevada. Um buraco começou a ser cavado ali. Acontece que, desde a década de 1980, toda tentativa de acelerar as obras esbarra na reação da comunidade local, e os trabalhos são interrompidos. Assim como entre os alemães e os americanos, os franceses já identificaram um local, em Bure, mas esbarram nos protestos dos moradores da região. A Finlândia conseguiu formar um depósito permanente, de 420 metros de profundidade. As obras estão perto de terminar e vão resultar no primeiro depósito definitivo da história. A Austrália pensou em ganhar dinheiro com o problema, mas os planos de construir um amplo depósito internacional, que receberia dejetos atômicos do mundo inteiro, também esbarraram na reação popular.

As armas nucleares são secretas, mas as usinas de energia compartilham informações.

PANELA DE PRESSÃO

A partir do reator, o calor é enviado para uma turbina, que alimenta um gerador. Como se envia calor? Na maior parte dos modelos de usinas, passando tubos de água pelo reator. Esses tubos costumam manter o líquido a alta pressão, de forma que ele não evapora perto dos 100 °C, como deveria. Nas usinas de Angra, por exemplo, a água alcança os 320 °C. Em muitos tipos de usina, não entra em contato diretamente com as turbinas: os tubos passam por dentro delas e aquecem um sistema secundário. Quando a água esfria, retorna para dentro do reator.

As usinas brasileiras utilizam o modelo de reator mais comum do mundo, o PWR, sigla em inglês para "reator de água pressurizada". De acordo com a Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), da ONU, existem 298 usinas com reatores PWR em operação

Getty Images

no mundo, com geração líquida total de 282.443 megawatts (MW), o que corresponde a cerca de 66% da capacidade nuclear instalada no planeta. Das 55 usinas nucleares em construção, 45 (81,8%) terão reatores PWR.

"Basicamente pode-se pensar numa panela de pressão convencional, na qual, com o aumento da pressão interna, a água ferverá numa temperatura maior que a normalmente utilizada", explica o físico Ítalo Curcio, professor da Universidade Presbiteriana Mackenzie.

Existem outros modelos, que variam principalmente de acordo com os moderadores utilizados e a forma adotada para conduzir o calor. Também muda o combustível: existe uma forma de gerar eletricidade a partir de urânio não enriquecido. "A vantagem do urânio natural é evitar o enriquecimento, que é dispendioso e tecnologicamente difícil", explica o físico Luiz Pinguelli Rosa, professor da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

"Para utilizar o urânio natural, eu não posso adotar, como moderador, a água comum, também chamada de água leve. Então sobram duas alternativas: o grafite e a água pesada", explica Pinguelli Rosa.

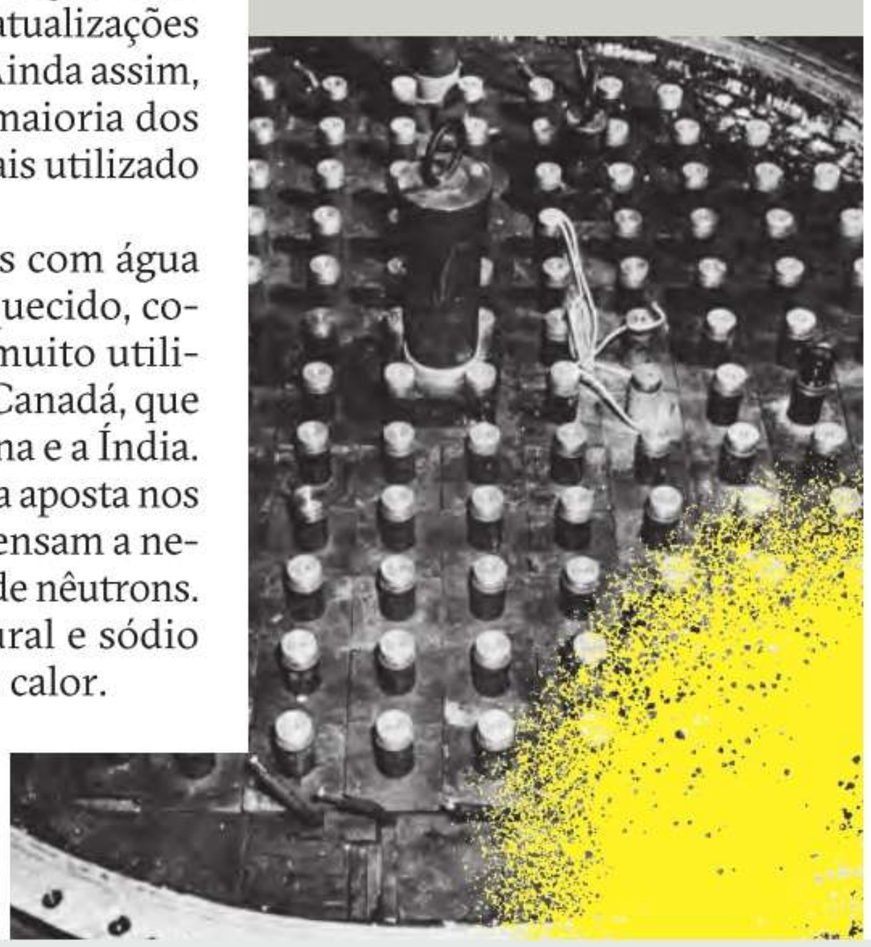
O grafite está na base dos reatores RBMK, desenvolvidos pela União Soviética, mais baratos, fáceis de operar – e instáveis, ao menos antes do acidente de Chernobyl, que levou o governo russo a fazer uma série de atualizações de segurança no modelo. Ainda assim, na Rússia, atualmente, a maioria dos reatores segue o padrão mais utilizado no mundo, o PWR.

Já o modelo de reatores com água pesada e urânio não enriquecido, conhecido como PHWR, é muito utilizado, principalmente, no Canadá, que o exportou para a Argentina e a Índia. Neste momento, a indústria aposta nos reatores rápidos, que dispensam a necessidade de moderadores de nêutrons. Eles utilizam urânio natural e sódio líquido para transportar o calor.

POR QUE URÂNIO?

Ele foi o escolhido entre outras dezenas de opções.

Primeiro, porque ele é relativamente comum no nosso planeta, e está disponível em minas de todos os continentes, o que facilita a exploração comercial e reduz a dependência de poucos países, como acontece com o petróleo. O Brasil, aliás, tem a quinta maior reserva de urânio do mundo, atrás de, pela ordem, Austrália, Cazaquistão, Canadá e Rússia. Segundo, e mais importante: o urânio gera uma quantidade enorme de energia ao ser alvejado por nêutrons, mas a ciência sabe como controlar esse processo com um grau razoável de segurança, de forma a gerar a reação em cadeia que garante que uma usina nuclear se mantenha produtiva 24 horas por dia (o que não acontece com as usinas eólicas e solares). O plutônio, por exemplo, é muito mais útil para bombas atômicas do que para usinas de geração de eletricidade, porque seu ciclo de fissão, e os subprodutos que ele gera, são muito menos controláveis.



A MAIOR PARTE DAS USINAS TEM VIDA ÚTIL DE PELO MENOS 40 ANOS, MAS MUITAS FORAM APOSENTADAS BEM ANTES.

SETE DÉCADAS

As usinas de geração de eletricidade a partir da fissão do núcleo de urânio surgiram pouco depois das bombas atômicas. A primeira vez que um reator nuclear produziu energia elétrica foi em 3 de setembro de 1948, em Oak Ridge, Tennessee. No início dos anos 1950, os russos tiraram o atraso e chegaram na frente ao inaugurar, em Obninsk, em 27 de junho de 1954, a primeira usina nuclear a enviar eletricidade para a rede nacional.

Naquela época, as usinas nucleares eram vistas como uma fonte de energia incrivelmente abundante - havia até quem dissesse que a eletricidade gerada por elas acabaria sendo distribuída de graça, ou quase. Não foi o que aconteceu. Muitas das primeiras instalações já foram abandonadas.

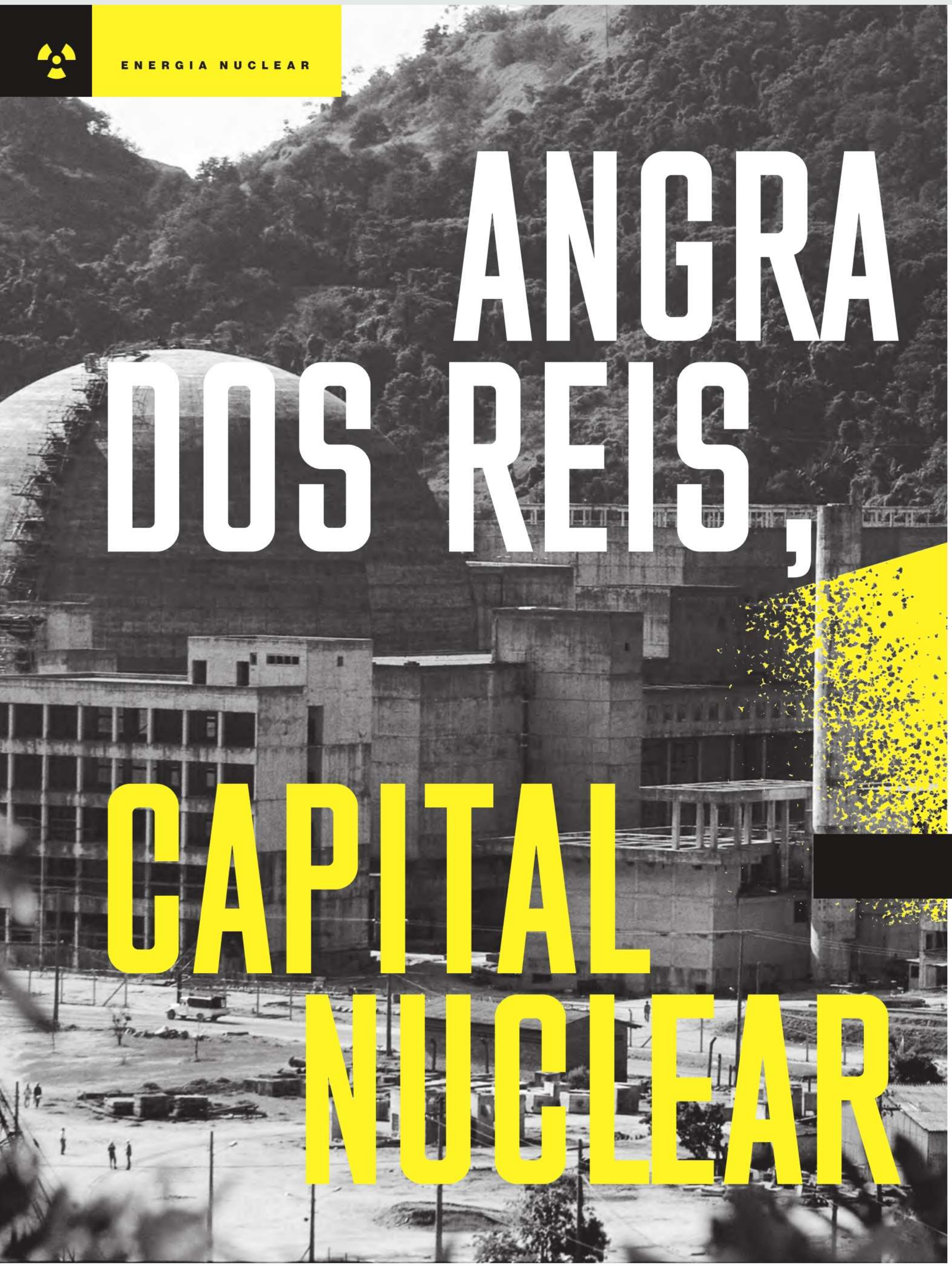
Afinal, usinas nucleares têm vida útil – são programadas para durar pelo menos 40 anos, mas dezenas delas foram desativadas com duas décadas de atividade por culpa dos custos operacionais.

O processo de desmontá-las é delicado e tão caro quanto o de construir. Prova de que, embora a teoria em si seja até simples, quebrar átomos acaba sendo muito mais complicado do que pode parecer à primeira vista.

Getty Images

ENERGIA NUCLEAR

ANGRA DOS REIS, CAPITAL NUCLEAR



AS DUAS USINAS ATÔMICAS DO BRASIL ESTÃO NA CIDADE DE 200 MIL HABITANTES. O GOVERNO QUER FAZER OUTRAS, MAS AINDA NÃO RETOMOU AS OBRAS DE ANGRA 3.

POR **TIAGO CORDEIRO**

SE OS REATORES NUCLEARES FUNCIONAM COMO PANELAS DE PRESSÃO GIGANTESCAS, como você leu na reportagem anterior, as duas panelas de Angra dos Reis (RJ) são modelos antenados com o que há de melhor no mercado. "Atualmente, depois de algumas atualizações tecnológicas, as usinas Angra 1 e 2 estão entre as mais modernas do mundo, tanto no quesito segurança quanto no rendimento", diz o físico Ítalo Curcio, professor da Universidade Presbiteriana Mackenzie.

As duas usinas são gerenciadas pela Eletronuclear, uma empresa subsidiária da Eletrobras. A companhia mantém uma sede administrativa no Rio de Janeiro e a unidade industrial em Angra dos Reis, localizada a 150 km da capital do Estado. Dos 1.746 funcionários da empresa, 1.320 trabalham em Angra e os demais no Rio. Somadas, as duas usinas geram 1.990 megawatts, que equivale a 40% do consumo do Estado do Rio de Janeiro e 3% do país.

Angra 1 (inaugurada em 1982) e 2 (na ativa desde 2001, depois de duas décadas de obras) utilizam o reator de água pressurizada, o PWR, o mais comum no mundo – 66% da capacidade nuclear instalada no planeta utiliza esse modelo.

O funcionamento é relativamente simples: a fissão dos átomos de urânio gera calor, que aquece a água do sistema primário. O líquido é pressurizado para evitar que entre em ebulição. Acontece que a água do sistema primário é radioativa, e não pode entrar em contato com o resto do circuito. Por isso, ela é enviada para uma tubulação, que passa dentro de um gerador de vapor, que por sua vez movimenta uma turbina que envia a energia elétrica para o Sistema Interligado Nacional.

BARRIS COM CONCRETO

O produto mais radioativo de Angra, como de qualquer usina, é o combustível da usina, os cilindros cheios de pastilhas feitas de urânio enriquecido. A cada ano, um terço desse material esgota sua capacidade produtiva, ainda que continue gerando radiação por séculos. Essas pastilhas gastas são colocadas em uma piscina especial. Menos radioativas, as ferramentas e roupas

Getty Images

DE GETÚLIO A BOLSONARO

Acompanhe a trajetória do programa nuclear brasileiro.

1953
Durante o mandato de Getúlio Vargas, o almirante Álvaro Alberto da Mota e Silva, primeiro presidente do Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq), compra da Alemanha três ultracentrífugas, que seriam utilizadas para enriquecer urânio. Os equipamentos só entrariam em operação na década de 1970.

1956
O governo Juscelino Kubitschek cria a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), com o objetivo de desenvolver a indústria nuclear brasileira. O órgão prevê a instalação de um reator nuclear no sul do Rio de Janeiro, em Mambucaba.

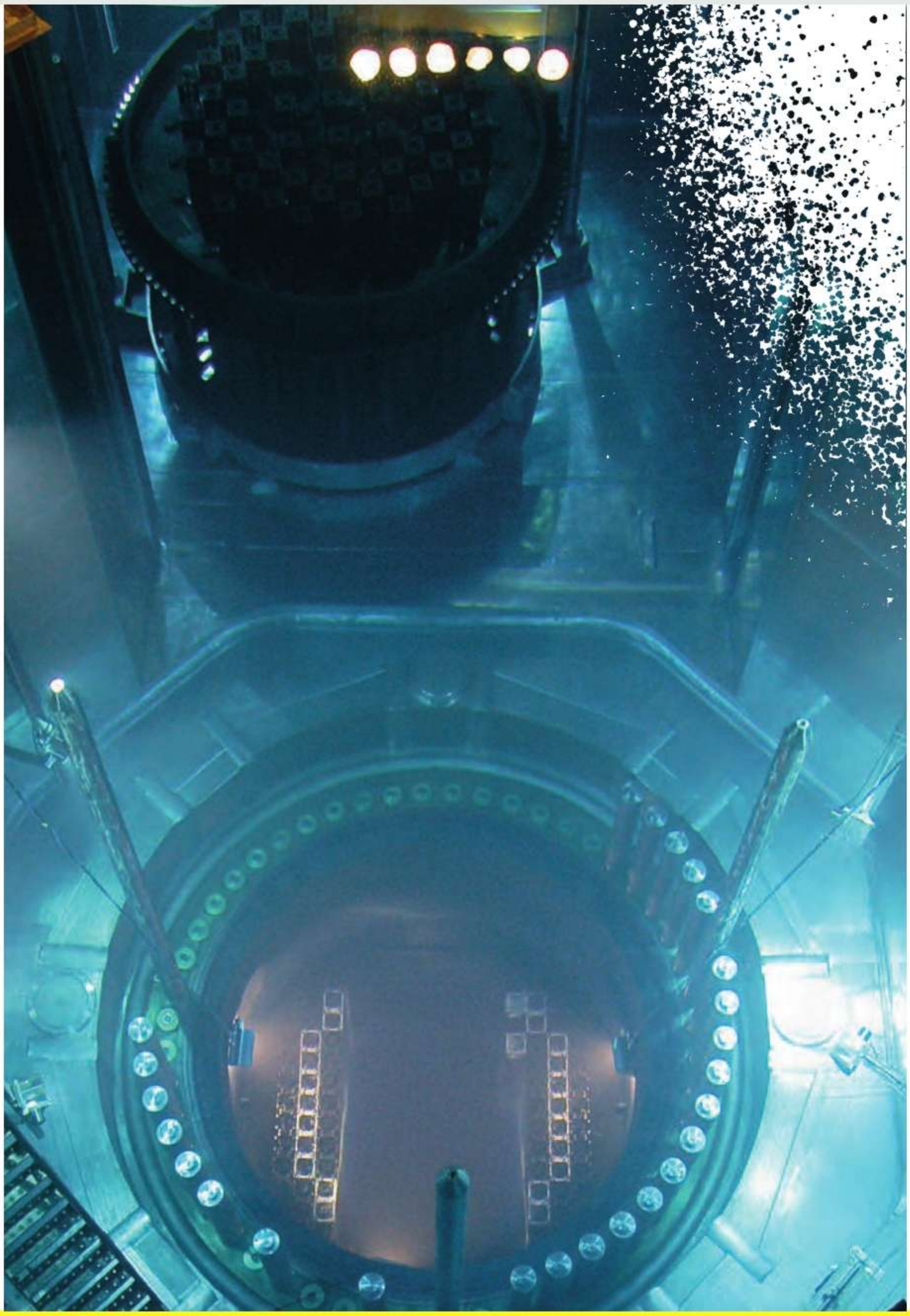
1957
Começa a operar o IEA-R1, primeiro reator nuclear do Hemisfério Sul. É utilizado para pesquisa.

que têm contato com o combustível são colocadas dentro de barris metálicos, posteriormente preenchidos com concreto e armazenados no Centro de Gerenciamento de Rejeitos de Angra e em depósitos temporários mantidos dentro da própria usina. Em paralelo com a construção de Angra 3, está prevista a inauguração de um depósito geológico, capaz de armazenar os resíduos por cem anos. Aliás, em que pé estão as obras de Angra 3?

O reator de Angra 2, uma usina que demorou 20 anos para ficar pronta e começar a operar.

Paradas, novamente. As obras começaram em 1984, apenas dois anos depois do início dos trabalhos de Angra 2, mas foram interrompidas diversas vezes desde então. A construção avançou entre 2010 e 2015, por exemplo, e foi paralisada mais uma vez em consequência da crise econômica.

A Eletronuclear informa que, atualmente, estão sendo executadas atividades de preservação das instalações do canteiro de obras e das estruturas e equipamentos da usina, ao custo de R$ 3 milhões mensais.



1961 1965 1970 1975 1980 1985

1968
O programa nuclear ainda patina quando a CNEN assinou um convênio com a Eletrobras visando à construção de uma usina nuclear em Angra dos Reis (RJ). Para viabilizar o projeto, em 1971 o governo compra dos Estados Unidos um reator de água pressurizada (PWR).

1975
Sob o governo de **Ernesto Geisel**, sob sigilo, o Brasil abandona a parceria com os Estados Unidos e assina um acordo de compra de equipamentos com a Alemanha. Durante as negociações, o país se compromete, diante da Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), a não utilizar energia nuclear para fins bélicos. A meta para o ano 2000 (não alcançada) era gerar, usando usinas nucleares, 53% da demanda nacional.

1979
Tem início o Programa Nuclear Paralelo, patrocinado pela Marinha, pelo CNEN e pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN). O objetivo é construir um submarino de propulsão nuclear e desenvolver tecnologia para enriquecer urânio de forma independente – objetivo alcançado em 1982.

1983
Um ano depois da inauguração de Angra 1, o presidente **João Figueiredo** suspende o acordo com a Alemanha e paralisa as obras das usinas nucleares de Iguape I e II, no litoral de São Paulo, iniciadas três anos antes e nunca mais retomadas.

1984
Começa a construção de Angra 3.

1988
É inaugurado em Iperó (SP) o Centro Experimental Aramar (CEA), mantido pela Marinha e ainda hoje um dos principais centros de pesquisa nuclear do país.

Getty Images

PRÓXIMOS PASSOS

A empresa entregou um estudo ao Ministério de Minas e Energia (MME), à Eletrobras e ao Programa de Parcerias de Investimentos (PPI), sugerindo diferentes modelos de financiamento para a retomada das obras. A previsão atual é reiniciar os trabalhos em 2021, para terminar em 2026. Neste momento, 62% dos trabalhos estão finalizados, mas ainda faltam R$ 14 bilhões para que a usina entre em operação.

Além disso, o governo federal anunciou, em 2019, que nos próximos anos pretende construir de quatro a oito novas usinas. Vale a pena gastar tanto dinheiro para erguer usinas que, por mais seguras que sejam, produzem resíduo radioativo?

Sem dúvida que sim, responde o físico brasileiro Dalton Ellery Girão Barroso, que em sua tese de doutorado descreveu em detalhes o funcionamento de uma bomba atômica *(leia mais na página 32)*.

"A energia nuclear é essencial para o desenvolvimento da humanidade. Não há outra fonte de energia (e que seja ecologicamente viável) capaz de satisfazer toda a demanda futura", ele afirma. "Se o Brasil quer garantir seu futuro na geração de energia elétrica, deve ter um programa de construção de usinas nucleares, sim, não há dúvidas. Veja o exemplo da China, tem 36 reatores nucleares em operação e está construindo mais 21 usinas."

Por outro lado, o risco de acidentes levou o governo da Alemanha a anunciar, em 2011, logo após o acidente de Fukushima, que iria interromper inteiramente seu programa nuclear até 2022. Das 17 usinas do país, oito foram encerradas poucas semanas após o incidente registrado no Japão.

BAHIA E CEARÁ

Além de Angra, outros locais estão envolvidos com a indústria nuclear brasileira. A empresa responsável por minerar urânio e fornecer o combustível para as usinas nucleares, a Indústrias Nucleares do Brasil, mantém uma única mina em operação – fica em Caetité, no sudoeste da Bahia. Deve iniciar em 2020 a extração na jazida de Itataia, localizada no município cearense de Santa Quitéria. Em paralelo, a Agência Nacional de Mineração (ANM) cobra das Indústrias Nucleares do Brasil atenção com a primeira barragem de exploração de urânio do país, em Caldas (MG).

As instalações ficaram na ativa entre 1982 e 1995, fornecendo urânio para abastecer Angra 1. A mina está fechada, mas ainda demanda um cuidado com os resíduos, que são mantidos em uma barragem que, segundo a ANM, corre o risco de se romper.

Outra área demanda manutenção: Abadia de Goiás, cidade próxima a Goiânia para onde foram enviados os resíduos do acidente radioativo com césio *(leia mais sobre o caso na reportagem final da edição)*.

Até hoje, nunca foi registrado nenhum acidente em Angra 1 e 2. Mas a Eletronuclear mantém um plano de contingência que respeita protocolos internacionais padronizados. A região do entorno foi dividida de acordo com o grau de risco e os moradores da área recebem treinamento constante.

Um sistema de alerta da Defesa Civil, composto por oito sirenes, é testado todo dia 10, sempre às 10h. Em todos os anos pares, são realizados exercícios parciais. Nos anos ímpares, a Defesa Civil realiza exercícios gerais de emergência.

ENERGIA NUCLEAR

O FUTURO ESTÁ NA FUSÃO

É O MESMO PROCESSO UTILIZADO PELO SOL E AS DEMAIS ESTRELAS, E TEM TODAS AS VANTAGENS DA ENERGIA NUCLEAR. COM UM BENEFÍCIO ADICIONAL IMPORTANTE: NÃO GERA RESÍDUOS RADIOATIVOS.

POR **VICTOR BIANCHIN**

OS REATORES DE FUSÃO NUCLEAR, QUE COMEÇARAM a ser desenvolvidos pelos russos nos anos 1950, são considerados a tecnologia do futuro para a geração de eletricidade. As vantagens da fusão justificam a empolgação. Afinal, ela utiliza pouquíssimos recursos renováveis, não emite gases causadores do efeito estufa – e, principalmente, não gera resíduos radioativos.

Mas por que, então, depois de seis décadas, ainda não existem usinas de fusão? Será que é possível acreditar que essa situação vá mudar? O futuro anunciado há quase sete décadas vai chegar em algum momento?

Antes de responder às perguntas, vamos entender do que se trata, afinal, a geração de energia a partir da fusão nuclear. Em poucas palavras, trata-se de imitar o que acontece nas estrelas. É um processo muito diferente da fissão nuclear que é utilizada pelas usinas nucleares atuais.

No processo de fissão nuclear desenvolvido atualmente, átomos de algum elemento instável, como o urânio-235, são bombardeados por um nêutron livre. Ele é capturado e a reação gera dois átomos mais leves e instáveis, energia térmica, radiação gama e mais nêutrons livres – esses últimos servem para fissionar os próximos átomos de urânio, provocando uma reação em cadeia.

A massa dos subprodutos da fissão é menor do que a inicial. Para onde vai essa diferença? Segundo a lei da conservação das massas, não é possível destruir energia, e sim apenas convertê-la em outra coisa. Portanto, a diferença entre os dois números representa justamente a massa que virou energia (na forma de calor).

Mas a fissão nuclear tem suas desvantagens. O lixo radioativo, a maior delas, consiste basicamente em átomos instáveis, que passam, no decorrer de um longo tempo, pelo processo de decaimento beta, que é quando um núcleo se transforma em outro ao emitir partículas beta, antineutrinos ou raios gama – essa é a famosa e temida radiação.

Trocando em miúdos: enquanto esses átomos não se estabilizarem, eles permanecerão emitindo radiação, precisando ser selados e armazenados em algum lugar seguro.

EFICIENTE E SEGURO

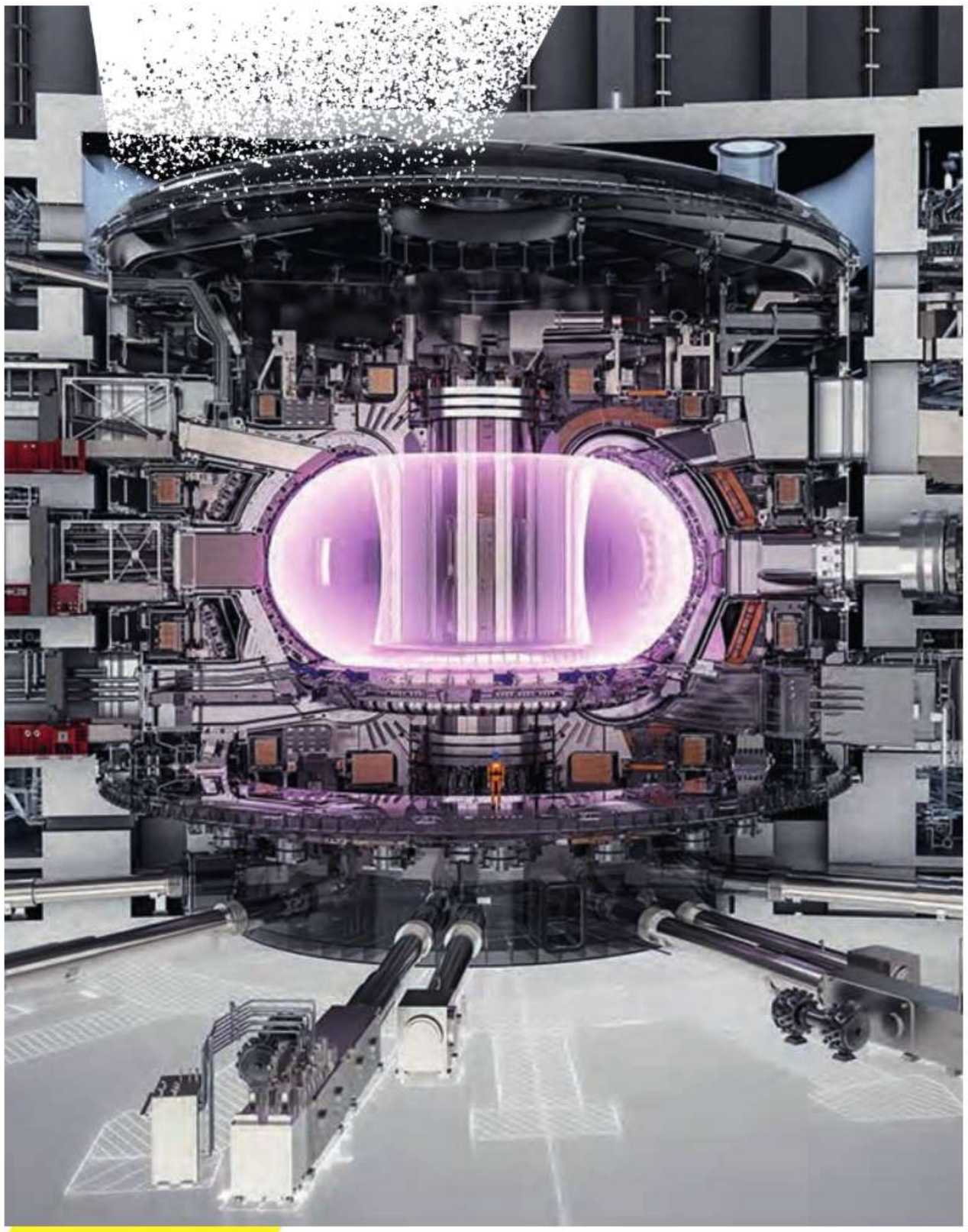
A fusão é muito comum no Universo. Nos centros de cada estrela, incluindo nosso Sol, a temperatura é tão absurdamente alta que os átomos de hidrogênio são forçados continuamente a se fundir, transformando-se em átomos de hélio. O calor viaja pelo vácuo universal até penetrar nossa atmosfera e aquecer a Terra. Se não fosse a fusão nuclear, não haveria vida no nosso planeta.

Reproduzir esse processo na Terra seria desafiador em alguns aspectos, mas não em todos. Começando pelo combustível. O hidrogênio em sua forma mais comum (chamada de prótio) não seria muito útil, mas seus isótopos deutério e trítio, por serem muito mais instáveis, caberiam no papel perfeitamente. O deutério tem um próton e um nêutron em seu núcleo e o trítio tem um próton e dois nêutrons.

Fundindo os dois, temos um átomo de hélio-4, que possui dois prótons e dois nêutrons no núcleo, e um nêutron livre em alta velocidade. A energia cinética liberada é o que propulsiona esse nêutron, que, por sua vez, irá esquentar a água que irá movimentar as turbinas com o objetivo de produzir eletricidade.

Deutério pode ser extraído com facilidade da água do mar, o que é um ponto positivo. Já o trítio é bem

Getty Images



Quando estiver pronto, o ITER vai gerar plasma a 150 milhões de graus Celsius.

mais raro, pois não ocorre espontaneamente na natureza, e criá-lo artificialmente é caro. Estuda-se substituí-lo pelo hélio-3, um isótopo do hélio que também é raro, mas só na Terra. Na Lua, em tese, é possível que existam grandes depósitos de hélio-3 devido à radiação solar.

Se fosse possível minerar esses depósitos, nós não precisaríamos usar o trítio. Mas é claro que, aí, já estaríamos entrando no campo da ficção científica. O trítio, por mais caro que seja, a ciência já sabe como conseguir: basta bombardear átomos de lítio com nêutrons. Mas e os produtos da reação? A fusão nuclear só gera hélio-4, um gás inerte. Zero lixo radioativo.

Pense no que isso significa: além de eliminar o grande problema dos depósitos desse tipo de dejeto, também evitaria por completo a possiblidade de desastres nucleares como o de Chernobyl e o de Fukushima.

Caso a operação de um reator de fusão nuclear desse algum problema, como o rompimento de uma proteção, por exemplo, o plasma onde o processo ocorre esfriaria e a reação seria interrompida imediatamente. Não haveria explosão ou vazamento de radiação.

Além de tudo isso, há o grande chamariz: a fusão de 1 kg de deutério e trítio produz 93,6 GWH. Isso é quatro vezes a energia produzida pela fissão da mesma quantidade de urânio-235. E é também um milhão de vezes mais do que a energia produzida pela combustão de 1 kg de gasolina. Na prática, isso significa que, fundindo 5 kg de água do mar por hora, daria para abastecer a demanda por energia do Brasil inteiro. Coisa de doido.

Então a fusão é menos perigosa, não gera lixo, usa ingredientes relativamente fáceis de obter e fornece muito mais energia do que os outros meios conhecidos. E ela já foi realizada, e não apenas em teoria: já existem reatores de fusão experimentais em vários países. Só no Brasil, três instituições mantêm os seus: Universidade de São Paulo (USP), Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe).

Até aqui, perfeito. Então, qual é o problema? Por que não temos um monte de usinas com reatores de fusão nuclear por aí?

GASTO EXCESSIVO

O que acontece é o seguinte: os núcleos atômicos têm cargas positivas e, por isso, se repelem. Para que a fusão aconteça, é preciso superar essa repulsão. A única forma de fazer isso é aquecer o material a temperaturas altíssimas, da ordem de dezenas a centenas de milhões de graus Celsius.
O aquecimento é tão violento que os átomos acabam formando o que se chama de plasma de fusão, uma sopa em que os elétrons e os núcleos dos átomos se separam e vagam livremente. Apenas obtendo o plasma é que é possível realizar fusão nuclear.

Aí está o primeiro grande desafio. Nas estrelas, o que acontece é um método de força bruta: a massa gigantesca desses corpos celestes gera uma pressão altíssima em seus núcleos, o que,

Divulgação

por sua vez, garante as temperaturas necessárias para que a fusão ocorra por ali. Mas, na Terra, criar as condições para esse plasma se formar é uma tarefa hercúlea. Manter esse plasma estável para que as reações ocorram é um segundo passo mais difícil ainda. E, mesmo que tudo isso seja alcançado, ainda existe o fato de que você estará colocando muito mais energia dentro do sistema do que retirando dele, ou seja, o experimento não faria sentido comercialmente. É como se estivéssemos utilizando 100 baterias de carro para energizar uma máquina que, em troca, te dá uma pilha AAA. Não há benefício ambiental que justifique esse desperdício de energia.

O modelo de reator mais utilizado para produzir fusão nuclear surgiu na Rússia e é conhecido como tokamak.

Acontece que ciência existe justamente para enfrentar obstáculos como esse e, atualmente, não são poucos os profissionais que estão tentando reverter esse cenário – além de dezenas de startups criadas nos últimos anos com o objetivo de solucionar detalhes técnicos das futuras usinas de fusão. A primeira etapa, que é criar uma máquina que consiga estabilizar o plasma, já é desenvolvida em vários laboratórios pelo planeta.

DONUT GIGANTE

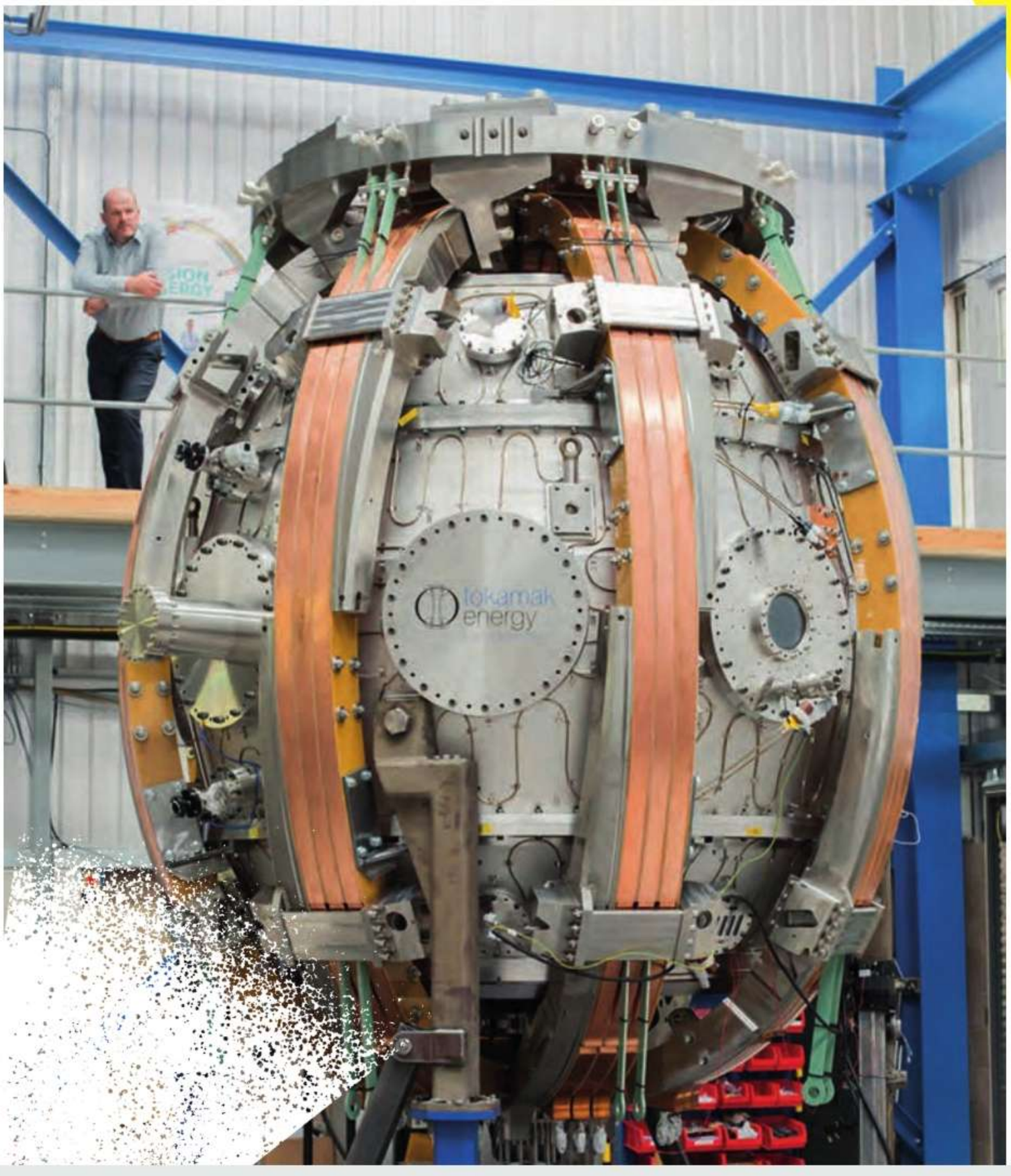
O ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), que está sendo construído na França, será o maior experimento de fusão nuclear do mundo e já anunciou seu "primeiro plasma" para 2025. Trata-se de um colosso em forma de donut com 16 mil m³ e 30 m de diâmetro onde o plasma será aquecido a uma temperatura de 150 milhões de graus Celsius, mais de dez vezes a temperatura do Sol.

A maior concorrente do ITER é a britânica Tokamak Energy, que conseguiu chegar aos 15 milhões de graus Celsius em um experimento em seu reator ST40 em 2018. A empresa declarou que pretende começar a explorar a energia de fusão nuclear comercialmente a partir de 2030.

"Tokamak", além de ser o nome de uma empresa, é um termo que descreve um tipo de tecnologia, já que é formado pelo acrônimo da expressão em russo para "câmara toroidal com bobinas magnéticas". Trata-se de um reator que usa campos magnéticos para criar e manter o plasma. O ITER e o ST40 são tokamaks, mas há outras tecnologias também sendo exploradas.

Os modelos estelarator (como o alemão Wendelstein 7-X) também usam campos magnéticos, mas têm formato de anéis retorcidos em vez de donut. Já os aparelhos de confinamento inercial consistem, principalmente (mas nem todos), em usar lasers superpoderosos para aquecer o combustível, formando o plasma – o reator mais famoso nesse modelo é o NIF (National Ignition Facility), instalado nos EUA.

Nenhuma dessas máquinas citadas será capaz de produzir energia elétrica em escala comercial. Todas servem como experimentos para que os cientistas possam compreender melhor as diversas complexidades da tecnologia. São passos seguros (ainda que lentos) na direção do sonho de abastecer o mundo com a energia limpa e praticamente inesgotável de fusão nuclear.



Divulgação

OS PIORES ACIDENTES

RADIAÇÃO À SOLTA

ENTRE DEZENAS DE VAZAMENTOS E EXPLOSÕES REGISTRADOS DESDE A CONSTRUÇÃO DAS PRIMEIRAS USINAS, OS PIORES ACONTECERAM NA UCRÂNIA, NO JAPÃO, NOS ESTADOS UNIDOS, NO CAZAQUISTÃO E NA INGLATERRA.

CHERNOBYL

O DIA EM QUE A TERRA TREMEU

ENTENDA O QUE CAUSOU O ACIDENTE NUCLEAR MAIS GRAVE DA HISTÓRIA E CONHEÇA OS BASTIDORES DA SÉRIE DA HBO SOBRE O CASO E SEUS PROTAGONISTAS.

POR **ANDRÉ BERNARDO**

ONDE Pripyat, Rússia
QUANDO 1986
VÍTIMAS até 100.000
NÍVEL DE GRAVIDADE (0 A 7) 7

NO DIA 29 DE NOVEMBRO DE 2016, TVS DO MUNDO INTEIRO noticiaram a inauguração da nova cúpula de segurança do reator 4 da usina nuclear de Chernobyl, distante 130 km de Kiev, a capital da Ucrânia. Apelidada de "Arca", a redoma de aço mede 108 m de altura, 250 m de largura e 150 m de comprimento. Orçada em US$ 1,7 bilhão, a Arca tem espaço para abrigar um prédio de 36 andares. Pesando 36 mil toneladas, o domo foi construído sobre o antigo sarcófago de concreto, com o objetivo de impedir novos vazamentos radioativos. Passados 30 anos, a antiga estrutura de contenção, erguida em volta do que sobrou do reator que explodiu na madrugada de 26 de abril de 1986, à 1h23min40, durante um teste de segurança, apresentava rachaduras e ameaçava ruir.

A nova cúpula foi projetada para durar 100 anos. "Até hoje, os russos custam a acreditar no que aconteceu. Para eles, seus reatores nucleares estavam entre os mais seguros do mundo", afirma o escritor e jornalista britânico Adam Higginbotham, autor de *Midnight in Chernobyl: The Untold Story of the World's Greatest Nuclear Disaster*. "A hipótese de explosão era algo ridículo, impensável. Foi esse excesso de confiança que nos levou ao maior desastre nuclear de todos os tempos."

O roteirista americano Craig Mazin, de 48 anos, foi um dos telespectadores que, naquela noite de 2016, assistiram às imagens transmitidas da antiga república soviética. Em sua casa em Pasadena, na Califórnia, não parou mais de pensar no assunto: "Se você perguntar a qualquer um como o Titanic afundou ou como JFK morreu, todo mundo vai responder. Mas, e Chernobyl?".

Quando um dos quatro reatores da usina de Chernobyl voou pelos ares, lançando pedaços de grafite altamente radioativo sobre os arredores da usina e liberando uma nuvem tóxica, que se espalhou por 12 países da Europa e causou irreparáveis danos à saúde de seus habitantes, Mazin tinha acabado de completar 15 anos e cursava o ensino médio na Freehold High School, em Nova Jersey. Do que ele se lembrava? Praticamente nada.

Foi quando teve a ideia de escrever uma minissérie sobre o pior acidente nuclear da história. "Chernobyl é um misto de falha humana e erro de projeto. No início, a culpa foi atribuída os operadores. Passados alguns anos, o governo admitiu que uma falha no reator RBMK-1000 contribuiu", explica Claudio Ubirajara Couto, da Associação Brasileira de Energia Nuclear (ABEN).

Getty Images

ÚLTIMOS MORADORES

Daquela noite em diante, Craig Mazin aproveitou o tempo livre para pesquisar sobre Chernobyl. Viajou até a Ucrânia. Na zona de exclusão de 2,6 mil quilômetros quadrados criada ao redor da usina, visitou a cidade-fantasma de Pripyat e conversou com os últimos de seus 48 mil habitantes. Apesar do risco de contaminação, cerca de 150 pessoas, todas na casa dos 70 anos, ainda moram lá. São os chamados *samosely*. "A evacuação de Pripyat e de outros vilarejos vizinhos aconteceu somente 36 horas depois da explosão do reator", afirma a física nuclear Emico Okuno, da Universidade de São Paulo (USP). "Pediram aos moradores que levassem apenas documentos, pertences e, por precaução, alguma comida. Disseram, também, que a evacuação seria temporária. Eles nunca mais voltaram."

Os nazistas conduziram em Prypiat, em 1941, uma operação de extermínio de judeus.

Um dos livros que Mazin leu para escrever a minissérie foi *Vozes de Chernobyl – A História Oral do Desastre Nuclear*, da bielorussa Svetlana Aleksiévitch. Resultado de 20 anos de pesquisas, o livro-reportagem levou a autora a visitar a região do acidente muitas vezes. Sempre que chegava à zona de exclusão, ouvia as mesmas recomendações: é proibido arrancar flores, sentar na relva ou beber água dos mananciais. Até os gatos, avisavam, deixaram de comer os ratos mortos. "A morte está por toda a parte", descreve a autora.

Foi de *Vozes de Chernobyl* que Mazin tirou dois dos principais personagens: o bombeiro Vasily Ignatenko, de 25 anos, um dos primeiros a chegar à usina, e sua mulher, Lyudmilla, de 23. Naquele dia, Vasily não estava de plantão. Ele e a mulher viajariam para Bielorrússia, onde moravam os pais dele.

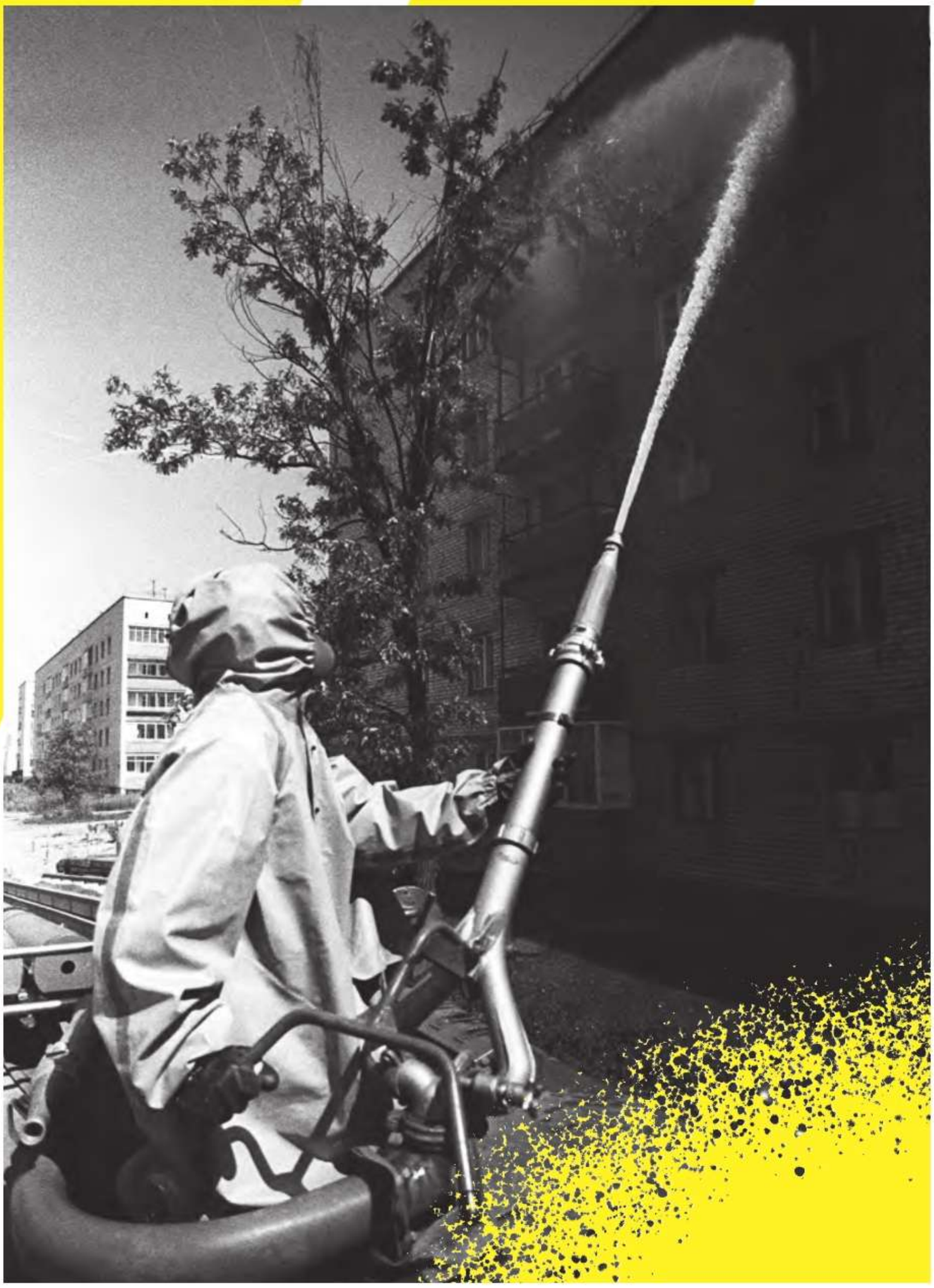
"No meio da noite, ouvi um barulho. Olhei pela janela. Ele me viu: 'Há um incêndio na central. Volto logo'", relata a viúva no livro. Vasily nunca voltou.

Da usina, foi mandado direto para um hospital em Moscou, onde morreu 14 dias depois. Segundo dados oficiais do governo, Vasily Ignatenko é um dos 31 mortos no acidente nuclear de Chernobyl. Segundo estimativas extraoficiais, o número de mortos varia de 4 mil (segundo a Organização das Nações Unidas) a 100 mil (para o Greenpeace).

A própria Svetlana perdeu uma irmã, médica, e a mãe, professora, após a tragédia. Desconfia que as duas foram vítimas do acidente. Mas a inspiração para escrever o livro surgiu mesmo em 1988, quando recebeu um telefonema de Eduard Boríssovitch Korotkóv. Do outro lado da linha, um dos pilotos de helicóptero que sobrevoaram a usina, jogando uma mistura de boro, areia e chumbo sobre o reator em chamas, pediu a ela que fosse vê-lo depressa.

"Tenho pouco tempo de vida e gostaria de contar o que sei", adiantou. Alguns de seus colegas já tinham morrido. Outros, tirado a vida. Os pilotos ficaram conhecidos como "Falcões de Chernobyl". Não fossem eles, a tragédia teria sido muito pior.

Getty Images



ACIDENTES ANTERIORES

Mas, afinal, o que aconteceu em Chernobyl? Como um simples teste de rotina desencadeou a maior tragédia nuclear da história?

O reator 4 da usina foi desligado na madrugada de 26 de abril, para que os técnicos pudessem avaliar por quanto tempo as turbinas continuavam girando em caso de corte de energia elétrica. O mesmo teste havia sido realizado no ano anterior, e os resultados tinham sido insatisfatórios. Novos componentes haviam sido instalados e precisavam ser submetidos a um novo teste.

Acontece que os operadores cometeram erros graves. Desativaram o mecanismo de desligamento automático do reator e desativaram metade das oito bombas de refrigeração. Ao perceber o problema, tentaram conter o dano lançando gás xenônio para dentro do reator. Não funcionou. Inseriram então hastes com boro. Tampouco adiantou. As reações atômicas dentro do reator saíram de controle e parte da água do sistema evaporou subitamente, gerando uma pressão que soltou a placa de cobertura do reator, que pesava mais de mil toneladas.

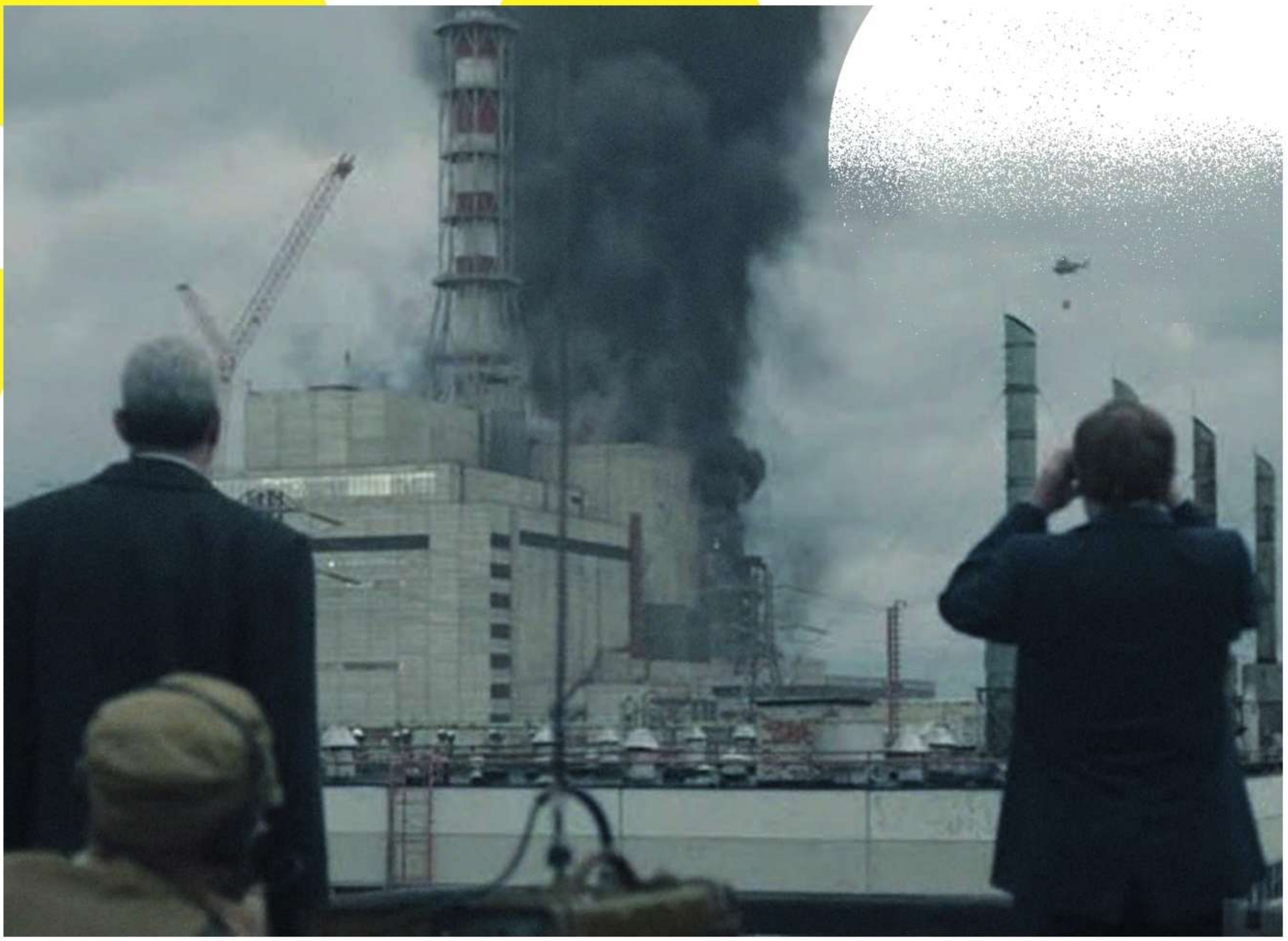
Seguiram-se duas explosões, sendo que a segunda lançou o grafite aquecido, altamente radioativo, para fora da estrutura do reator. O núcleo fundiu e pegou fogo. Demoraria dias para o incêndio ser contido graças ao esforço de pessoas como os Falcões de Chernobyl.

A falha dos operadores não foi a única causa do acidente. "Aquela não foi a primeira vez que um reator RBMK-1000 apresentou falhas", afirma o doutor em Física Nuclear Luís Antônio Albiac Terremoto, do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN). "Antes de Chernobyl, houve dois acidentes semelhantes na antiga URSS: um na Rússia, em 1975, e outro na Lituânia, em 1983. No entanto, nada fizeram para corrigir essas falhas. O acidente de Chernobyl poderia ter sido tranquilamente evitado."

No momento do acidente, a usina utilizava quatro reatores desse gênero, desenvolvidos três décadas antes e que, somados, geravam 10% da eletricidade consumida pela Ucrânia na época. Mas o modelo se tornava instável quando operava em baixas potências, porque o grafite passava a gerar calor excessivo, capaz de transformar a água do interior do reator em vapor submetido a alta pressão. Nos anos que se seguiram ao acidente, os reatores RB-MK foram submetidos a revisões de segurança. A Rússia utiliza poucos desses modelos, mas eles agora são mais estáveis.

Após a evacuação da cidade, jatos de água foram usados para retirar a poeira radioativa.

Getty Images



Cena da série da HBO retrata as incursões com helicópteros que lançavam areia sobre o reator.

FUNGOS RADIOATIVOS

Exibida entre 6 de maio e 3 de junho de 2019 pela HBO, a série *Chernobyl* arrancou aplausos até mesmo na Rússia. Poucos, verdade, mas arrancou. O político ucraniano Vladimir Medinsky é dos que elogiaram a produção. Seu pai, ainda vivo, foi um dos 600 mil "liquidadores" que, mesmo trabalhando em condições insalubres e sem roupas de proteção adequadas, evitaram o pior.

O ministro da Cultura do governo Putin, porém, não é regra. É exceção. Em geral, os russos não gostaram nada do que viram. Alegaram, em sua maioria, distorção dos fatos. Tanto que pretendem, eles mesmos, contar sua versão da história. A missão está a cargo do cineasta russo Aleksey Muradov que, em entrevista ao jornal mais lido da Rússia, o *Komsomolskaya Pravda*, declarou que o roteiro vai girar em torno do suposto envolvimento de espiões da agência de inteligência americana (CIA, na sigla em inglês) na tragédia. "Há uma teoria de que os americanos se infiltraram na usina de Chernobyl. Muitos historiadores não descartam a possibilidade de que, no dia da explosão, um agente dos serviços de inteligência do inimigo estivesse na estação", discorreu o diretor.

"A KGB chegou a investigar a hipótese de atentado terrorista, mas nada descobriu", afirma o historiador Serhii Plokhii, da Universidade de Harvard, e autor do livro *Chernobyl – The History of a Nuclear Catastrophe* (ainda inédito no Brasil). A verdade é que tentar jogar a culpa em espiões americanos não faz o menor sentido. "A suspeita de que há envolvimento da CIA no acidente tem mais a ver com a atmosfera política da Rússia de 2019 do que com a da antiga União Soviética de 1986", diz ele.

A vida na região foi transformada pela tragédia. Em 2008, um grupo de pesquisadores identificou 37 espécies mutantes se desenvolvendo em Chernobyl, incluindo um fungo que se especializou em se alimentar de materiais contaminados. Apesar de todos os riscos, milhares de pessoas fazem turismo em Prypiat; só em 2019, a área já recebeu mais de 85 mil visitantes - que podem, inclusive, entrar na sala de controle onde tudo deu errado. É preciso ser maior de 18 anos e não se pode permanecer na sala por mais do que cinco minutos.

Getty Images

FUKUSHIMA

TRAGÉDIA EM TRÊS ATOS

ENTENDA COMO O ERRO HUMANO, POTENCIALIZADO POR UM TSUNÂMI, TRANSFORMOU O DESASTRE DE FUKUSHIMA, DE 2011, NO MAIS GRAVE ACIDENTE NUCLEAR DESDE CHERNOBYL.

POR **ANDRÉ BERNARDO**

ONDE Fukushima, Japão
QUANDO 2011
VÍTIMAS até 1.600
NÍVEL DE GRAVIDADE (0 A 7) 7

OS RELÓGIOS DE TÓQUIO MARCAVAM 14H46 DO DIA 11 DE MARÇO DE 2011 quando um terremoto de 9,1 graus na escala Richter, o mais devastador já registrado no Japão, virou o nordeste da ilha de cabeça para baixo. "Um abalo sísmico dessas proporções equivale à explosão de 193 milhões de toneladas de TNT", estima o físico Luís Antônio Albiac Terremoto, do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN). Sirenes ecoaram por toda a região de Tohoku, uma das mais castigadas pelo tremor. Muitas famílias pegaram seus pertences, deixaram suas casas e fugiram dali. Outras preferiram ignorar o alerta de tsunâmi. "O pior já passou", pensaram. Estavam enganados.

Quarenta minutos depois, uma onda de 15 metros destruiu o que encontrou pelo caminho e, segundo estimativas conservadoras, deixou um rastro de 15.800 mortos, 2.500 desaparecidos e 400 mil casas e prédios destruídos. Mas o pesadelo ainda não tinha terminado.

De desastrosa, a situação tornou-se catastrófica quando o terremoto destruiu a rede elétrica e derrubou as linhas de energia que mantinham ligado o circuito de refrigeração dos seis reatores da central nuclear Fukushima Daiichi. Dentro de gigantescas câmaras de concreto, o combustível nuclear fica mergulhado em tanques, que ajudam a reduzir o calor no núcleo dos reatores.

Em caso de apagão, as usinas possuem um segundo sistema de refrigeração, movido por geradores a óleo diesel. Em Fukushima, eles estavam a 10 m acima do nível do mar e entraram em colapso depois de serem atingidos pelo tsunâmi. Para piorar, as baterias usadas para substituir os geradores se esgotaram em poucas horas e as bombas que coletavam água do mar ficaram inoperantes. "Os geradores a diesel deixaram de funcionar. Isso afetou, além do sistema de refrigeração, o controle dos reatores 1, 2 e 3", explica o físico Ivan Salati, da Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA).

Sem ter como resfriar o combustível nuclear, a temperatura da água que envolvia o urânio aumentou tanto (possivelmente alcançou os 1.800 °C) que começou a evaporar. A pressão na parte superior das câmaras de contenção causou explosões de hidrogênio que derreteram três dos seis reatores. O acidente se tornou inevitável.

As usinas 1, 2 e 3 de Fukushima vazaram material radioativo. "O acidente foi uma combinação de erro humano, falha técnica e desastre natural", descreve o físico Edwin Lyman, autor de *Fukushima: The Story of a Nuclear Disaster* (2014) e diretor da Union of Concerned Scientists (UCS). "Quando o pessoal da central se deu conta do que havia acontecido, já era tarde demais."

"SAMURAIS ATÔMICOS"

Quando indagado sobre o fatídico 11 de março de 2011, o engenheiro nuclear Masao Yoshida, que dirigia a usina nuclear por ocasião do acidente, costumava citar a Batalha de Iwo Jima, a mais sangrenta da Guerra do Pacífico, em 1945. Tal e qual o general Tadamichi Kuribayashi, designado para liderar 22 mil soldados contra a invasão de 110 mil fuzileiros navais americanos, Yoshida arriscou sua vida para defender Fukushima e minimizar os prejuízos causados por explosões, incêndios e vazamentos. Na época, contrariou a recomendação da Tokyo Eletric Power (Tepco), a empresa responsável pela usina, que, por causa do aumento dos índices de radiação, mandou os 800 operários da central bater em retirada.

Yoshida permaneceu em seu posto de comando para ajudar a controlar a situação. Ou, pelo menos, tentar. Munidos de tanques de oxigênio, os 50 operários de Fukushima usavam roupas de chumbo, enganavam a fome com água e biscoito e enfrentaram uma radiação estimada de 250 mSv (milisieverts; uma tomografia de corpo inteiro não emite mais do que 10 mSv). Mas Yoshida não lutou sozinho. Fazia parte de um exército de 300 homens que, entre técnicos, engenheiros e voluntários, se revezavam na tentativa de resfriar os reatores superaquecidos das usinas 1, 2 e 3, impedindo seu derretimento e, pior, o vazamento de material radioativo.

Por seu ato de bravura, eles ganharam status de heróis. Foram apelidados de "Os 50 sem rosto" pelo *The New York Times* e chegaram a ser recebidos pelo primeiro-ministro japonês, Yoshihiko Noda, em 2012.

"O trabalho deles foi muito importante. Sem os 50 de Fukushima, o índice de derretimento dos núcleos das três usinas teria sido consideravelmente maior e, consequentemente, a probabilidade de escape de uma quantidade ainda maior de material radioativo para o meio ambiente teria sido mais elevada", afirma Luís Antônio Terremoto, do IPEN.

Dois anos e quatro meses depois do acidente, em julho de 2013, Yoshida morreu, aos 58 anos, vítima de câncer no esôfago, possivelmente resultado do contato com radiação. Se depender do cineasta Wakamatsu Setsuro, seu heroísmo não será esquecido. Ele está por trás da transposição do livro *On the Brink: The Inside Story of Fukushima Daiichi* (2012), de Ryusho Kadota, para os cinemas. "Embora seu heroísmo não tenha impedido o derretimento dos reatores, os 50 de Fukushima merecem crédito por ter evitado o pior", pondera Lyman.

"Mas a segurança de uma usina não deve depender dos trabalhadores que arriscam suas vidas. É preciso que haja um planejamento maior para que, mesmo sob condições adversas, a segurança não seja colocada em risco."

Oito anos após o acidente, a região ainda é monitorada de perto.

Getty Images

REFUGIADOS EM CASA

O acidente desenterrou um neologismo que andava sumido do vocabulário japonês: *hibakusha*. Criado por ocasião dos bombardeios contra Hiroshima e Nagasaki, em 1945, para designar "os sobreviventes da bomba atômica", o termo, hoje, é usado para identificar os antigos moradores de cidadelas próximas à central de Fukushima, como Namie, Iitate e Futaba. "No dia do acidente, o governo ordenou que residentes em uma área de 3 km ao redor da usina deixassem suas casas. No dia seguinte, a zona de evacuação foi ampliada para 20 km e, 72 horas depois, para 30 km. Ao todo, 160 mil pessoas deixaram suas casas", relata a física nuclear Emico Okuno, da Universidade de São Paulo (USP).

Passados oito anos, muitas famílias ainda vivem em alojamentos temporários. São refugiados em seu próprio país. Minamisoma é uma das muitas cidades assombradas pelo fantasma da radiação. Situada a 25 km da central de Fukushima, ganhou visibilidade depois que um de seus 71 mil habitantes se recusou a obedecer ao plano de evacuação do governo. Em vez de fugir para um abrigo improvisado, o escritor e tradutor Takashi Sasaki, de 72 anos, preferiu ficar em casa, cuidando da esposa, Yoshiko, portadora de Alzheimer. Não satisfeito, ele criou um blog e publicou um livro, *Fukushima: Living the Disaster* (2013). "Seguimos com nossas vidas biológicas, mas nos roubaram nossas vidas biográficas", escreveu Sasaki, parafraseando um de seus autores favoritos, o espanhol Miguel de Unamuno.

Semanas após o incidente, o sol se põe sobre a cidade vazia de Minamisoma, onde um único morador se recusou a ir embora.

Em 2012, o físico Johnny Ferraz Dias, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), visitou algumas das cidades-fantasma próximas à Fukushima. Lá, coletou amostras para análise e mediu o índice de radiação. "O que mais me impressionou foi a atmosfera de tristeza. As casas estavam abandonadas, mas era possível entrar nelas. Dava para ver que seus moradores tiveram que sair às pressas. Não acredito que essas cidades voltem a ser habitadas em um curto ou médio espaço de tempo", relata o físico. Sasaki morreu em 2018, vítima de câncer no pulmão.

Getty Images

O BRILHO DA MORTE

O acidente mais grave do Brasil matou quatro.

Dezenove gramas. Essa é a quantidade de Césio-137 encontrada por dois catadores de lixo de Goiânia (GO) em um aparelho de radioterapia dentro de uma clínica abandonada, no dia 13 de setembro de 1987. O maior acidente radioativo já registrado no Brasil – e o maior do mundo fora de uma usina nuclear – teve início quando Wagner Mota Pereira, de 19 anos, e Roberto Santos Alves, de 21, levaram o aparelho para casa. Cinco dias depois, venderam o equipamento para o dono de um ferro-velho, Devair Alves Ferreira, de 37 anos, que pediu a dois de seus funcionários, Israel Batista dos Santos, de 20 anos, e Admílson Alves de Souza, de 18, que o desmontassem. Dentro do cilindro comprado como sucata, uma substância que reluzia no escuro. Encantado com aquele pó reluzente, Devair distribuiu fragmentos de presente para amigos e familiares. A primeira vítima fatal foi Leide das Neves Ferreira, de 6 anos. Sobrinha de Devair, ela chegou a ingerir partículas de césio. A mulher do dono do ferro-velho, Maria Gabriela, de 37 anos, também não resistiu. Os dois funcionários de Devair também sucumbiram à radiação, mas Wagner e Roberto sobreviveram. Wagner virou pastor evangélico e mora em Anápolis, a 48 km de Goiânia. Já Roberto trabalha em uma loja de autopeças e vive no Jardim Europa, em São Paulo. Com quadro de depressão e dependência química, Devair morreu em 1994, de cirrose hepática. O ferro-velho foi demolido. Dezenas de casas da vizinhança também. Seis mil toneladas de lixo radioativo, entre roupas, objetos e móveis, foram levadas até Abadia de Goiás, a 23 km da capital, onde ficaram enterradas em dois contêineres de concreto, com 60 m de comprimento, 18 de largura e 8 de altura.

"As crianças e os adolescentes tiveram que abandonar os estudos, foram separados dos pais e perderam os amigos que tinham", relata a psicóloga Suzana Helou, autora de *Os Bastidores do Césio-137* (2017).

Em 1992, os responsáveis pela clínica foram condenados a três anos e dois meses de detenção por homicídio culposo. Apenas um ano depois, a pena foi reduzida a serviços comunitários. Até hoje, o governo de Goiás paga pensão vitalícia às vítimas do Césio-137. O motorista aposentado Odesson Alves Ferreira, de 64 anos, é um deles. Irmão de Devair, ele perdeu a palma da mão esquerda e parte do indicador direito. "Perdi tudo. O preconceito me impedia de viver em sociedade", recorda o ex-presidente da Associação de Vítimas do Césio-137.

"O acidente com o Césio-137 ainda não caiu no esquecimento, mas caminha para isso", alerta Célia Helena Vasconcelos, da Universidade Federal de Goiás (UFG), autora do livro *Césio-137, Trinta Anos Depois* (2017).

Divulgação

ZONA DE PERIGO

Nem falha técnica, nem desastre natural. A conclusão a que chegou um comitê de peritos formado em setembro de 2011 pela Câmara Baixa do Japão, o equivalente à Câmara dos Deputados no Brasil, para investigar o acidente nuclear de Fukushima foi "catástrofe de origem humana".

Formada por dez cientistas de diferentes áreas e sem vínculos com o governo, a comissão, liderada pelo médico Kiyoshi Kurokawa, da Universidade de Tóquio, analisou documentos, ouviu 1.167 testemunhas – entre elas o ex-primeiro-ministro Naoto Kan, que renunciou ao cargo em agosto de 2011 – e constatou que as autoridades responsáveis e os gestores da usina não fizeram o suficiente para prevenir a tragédia.

O relatório de 641 páginas, entregue ao líder do Parlamento japonês, Takahiro Yokomichi, em 2012, diz ainda que a catástrofe "poderia ter sido evitada". A empresa que operava Fukushima sabia, desde 2006, do perigo de um apagão em caso de tsunâmi e da chance de danos aos reatores.

Tem mais: um relatório da própria Tepco, de 2008, já alertava que, caso ocorresse um terremoto de magnitude 8 perto da costa, a central poderia ser atingida por uma onda de mais de 15 m.

O projeto original da usina, que começou a operar em 1971, previa ondas de até 5,7 m. "Algumas medidas de prevenção poderiam ter sido tomadas, como a construção de uma barreira de proteção contra tsunâmi maior do que a existente na usina e a localização dos geradores a diesel de emergência em lugares mais elevados ou, ainda, em edifícios protegidos contra alagamentos", aponta Claudio Almeida, da Associação Brasileira de Energia Nuclear (ABEN). Em 2017, três ex-diretores da empresa – o então presidente, Tsunehisa Katsumata, de 77 anos, e os ex-vice-presidentes Ichiro Takekuro, de 71, e Sakae Muto, de 67 – foram a julgamento acusados da morte de 44 pacientes de um hospital em Futaba, a 3 km da usina, que tiveram que evacuar a unidade às pressas por causa do risco de contaminação. Os três, que se declararam inocentes, cumprem pena de cinco anos de prisão.

INIMIGO INVISÍVEL

O fantasma de Fukushima voltou a assombrar o povo japonês em fevereiro de 2017, quando a Tepco registrou um nível recorde de radiação no reator de número dois: 530 Sv por hora. A título de comparação, a medição anterior, de 2012, tinha registrado 73 Sv. "Essa dose é extremamente alta e um indivíduo exposto a uma radioatividade desse nível certamente morreria na hora", alerta Johnny Ferraz Dias, da UFRGS.

Como os índices de radiação são mais altos do que qualquer humano conseguiria suportar, a empresa enviou um robô, guiado por controle remoto, para examinar o interior da usina. Projetado para suportar uma exposição de até 1 mil Sv, o robô teve que ser retirado às pressas antes de completar a missão: uma radiação estimada de 650 Sv por hora causou avarias.

Oito anos depois do acidente de Fukushima, a maior operação de descontaminação nuclear da história não tem prazo para terminar. Ao contrário da União Soviética, que cobriu a usina de Chernobyl com uma redoma de concreto, o Japão decidiu desmantelar Fukushima. A desativação deve durar 40 anos, a um custo de US$ 192,5 bilhões. Em reação ao incidente, o governo decidiu desativar todas as usinas nucleares em operação. Nos últimos anos, algumas poucas foram reabertas: atualmente estão ativos apenas nove dos 42 reatores funcionais do país.

A destruição da usina nuclear de Fukushima, fotografada por um satélite, três dias depois do tsunâmi.

Getty Images

MAYAK

ROTINA DE ACIDENTES

DE 1949 A 2017, O COMPLEXO MAYAK ACUMULOU CATÁSTROFES, DO DESPEJO DE MATERIAL RADIOATIVO NUM RIO A EXPLOSÕES DE REATORES. AINDA ASSIM, O LOCAL CONTINUA NA ATIVA.

POR **TIAGO CORDEIRO**

ONDE Chelyabinsk, Rússia
QUANDO 1957
VÍTIMAS até 270 mil
NÍVEL DE GRAVIDADE (0 A 7) 6

O GOVERNO RUSSO NEGA. Mas um estudo de agosto de 2019 aponta o dedo na direção do Complexo de Mayak. Liderados por John Seinfeld, do Instituto de Tecnologia da Califórnia, 67 pesquisadores concluíram que um vazamento massivo de rutênio, ocorrido em 2017 e que atingiu toda a faixa que vai da Finlândia à Grécia, passando por Suíça e Itália, só pode ter partido da instalação russa. Não é a primeira vez que um elemento radioativo vaza do local. Na verdade, desde 1949, Mayak é cenário de vazamentos e explosões – a mais grave em 1957.

A usina foi construída a mando de Josef Stalin, que em 1945 determinou que 40 mil prisioneiros da Segunda Guerra fossem enviados para a obra em Chelyabinsk, 1.500 km ao sudeste de Moscou. Quatro anos depois, o sistema de armazenamento de resíduos estava lotado. Os gestores da usina passaram a lançar dejetos radioativos no rio Techa, onde nadavam e pescavam os mais de 100 mil moradores da região. Só a partir de 1956, cercas foram instaladas nas margens. E 10 mil das pessoas que viviam ao longo do Techa foram forçadas a se mudar, sem saber por quê.

Aliás, foi sempre negando informações que o governo russo transformou a região em uma das mais radioativas do planeta. A explosão de 1957, por exemplo, só se tornou pública para o mundo em 1976 e para os russos ao final dos anos 1980.

DEPÓSITO AQUECIDO

Construído para fabricar plutônio-239, usado para construir bombas atômicas, o complexo mantinha seis reatores. Em 29 de setembro de 1957, um dos tanques subterrâneos onde eram guardadas 70 toneladas de resíduos explodiu. O sistema de resfriamento com base em água corrente parou de funcionar meses antes, ninguém percebeu e o material superaqueceu, lançando a tampa de concreto para longe. O material lançado pela explosão atingiu uma área estimada em 52 mil quilômetros quadrados, onde viviam 270 mil pessoas. Era o maior acidente radioativo da história até então, e permaneceu no topo do pódio até os anos 1980. Só seria superado por Chernobyl e Fukushima.

Parte das vítimas foi retirada de casa, do dia para a noite, sem aviso prévio – um procedimento que seria repetido quase 30 anos depois, em Chernobyl. Uma das vilas mais próximas da usina, Satlykovo, virou uma cidade radioativa abandonada. Estava dentro da área de exclusão que passou a ser monitorada constantemente, e de forma sigilosa, por pesquisadores que descobriram que muitos dos moradores são vítimas de Síndrome Crônica da Radiação, um problema caracterizado pela exposição a baixos níveis de radiação, mas ao longo de muito tempo. São pessoas com anemia, problemas digestivos e imunológicos, dores nos ossos e falhas musculares. O acompanhamento continua, em especial junto à comunidade de Muslyumovo, que nunca foi evacuada (possivelmente porque os moradores são da etnia asiática Bashkir, discriminada pela maioria dos russos). Seus moradores estão na quarta geração de pessoas expostas à radiação diariamente.

O complexo foi construído por prisioneiros de guerra a partir de 1945.

Divulgação

FOGO NA FÁBRICA

Incidente na Inglaterra espalhou fumaça radioativa.

O Reino Unido queria entrar para o clube nuclear, e tinha pressa. Com esse objetivo, no fim da década de 1940 construiu no condado de Cumbria, na fronteira com a Escócia, a fábrica de bombas Windscale. Adaptada para operar como uma usina de geração de eletricidade, capaz de reprocessar o plutônio utilizado no desenvolvimento de bombas, ela funcionava com capacidade máxima até que, em 10 de outubro de 1957, o núcleo do reator pegou fogo. A fumaça radioativa provocou pelo menos 240 casos de câncer de tireoide. O governo britânico fez de tudo para evitar que as notícias vazassem. Por isso, não retirou os moradores da região. Apenas proibiu, por um mês, o consumo de leite das vacas locais. Os restos do reator queimado foram fechados dentro de silos. Estão lá ainda hoje, sem que ninguém tenha coragem de abrir as portas, com medo da radiação. O mar da região contém alto nível de radiação, possivelmente porque, nos primeiros anos de funcionamento de Windscale, parte dos resíduos foi lançada no mar.

RIO RADIOATIVO

Em 1967, boa parte do lago Karachay secou no verão e a poeira radioativa das margens formou uma nuvem tóxica quase tão perigosa quanto a formada pela explosão de 1957. O incidente era o terceiro de grande porte, em apenas duas décadas de existência do complexo. Outros se seguiriam.

Além do vazamento mais recente, há indícios de que, na virada do século 20 para o 21, funcionários da usina tenham sido orientados a despejar estrôncio-90 no rio Techa, ao longo do qual ainda vivem aproximadamente 4 mil pessoas. O CEO da usina à época, Vitaly Sadovnikov, foi condenado em 2006, mas posteriormente recebeu um indulto.

Contaminado desde 1949, o rio Techa é cercado, mas moradores entram nele.

Atualmente, o governo russo mantém uma zona de exclusão de 250 quilômetros quadrados no entorno de Mayak. A usina não produz mais plutônio, e seus reatores estão desativados. Oficialmente, é utilizado para produzir elementos radioativos usados em aparelhos médicos e no processamento de lixo nuclear.

Ao todo, desde a fundação do complexo, foram identificados 35 acidentes – quatro deles em um único ano, 1994. O incidente de 2017 deixa claro que o cuidado com os procedimentos de segurança continua tão escasso quanto há 70 anos.

Divulgação

THREE MILE ISLAND

FIM DE UMA ERA

O ACIDENTE DA USINA AMERICANA DE THREE MILE ISLAND NÃO FOI GRAVE. MAS DEIXOU OS AMERICANOS COM A SENSAÇÃO DE QUE A ENERGIA NUCLEAR NÃO ERA CONFIÁVEL.

POR **TIAGO CORDEIRO**

ONDE Harrisburg, Estados Unidos
QUANDO 1979
VÍTIMAS 333
NÍVEL DE GRAVIDADE (0 A 7) 5

OLHANDO COM FRIEZA, O ACIDENTE DA USINA DE THREE MILE ISLAND NÃO PARECE GRAVE. O vazamento foi contido, não houve nenhuma explosão, nem dano considerável ao meio ambiente, e o total de pessoas atingidas de alguma forma, na estimativa mais pessimista, não passa dos 333. Ainda assim, o caso mudou a trajetória das usinas americanas. Nenhuma permissão para a construção de novas instalações foi concedida desde aquele ano até 2012.

Muitos dos projetos que já haviam sido liberados foram engavetados e usinas funcionais acabaram fechadas antes de completar sua vida útil. Se em 1979 havia 177 usinas operacionais ou em construção, em 1998 o número havia caído para 112. Afinal, o que aconteceu de tão grave na madrugada de 28 de março de 1979?

O sistema de resfriamento de um dos reatores do local entrou em pane. Era um problema previsível, para o qual havia respostas automáticas: a turbina parou de funcionar e o vapor acumulado, não radioativo, foi liberado para a atmosfera. Os moradores da região ouviram naquela madrugada o equivalente ao som de uma chaleira gigantesca.

Com a pressão da água reduzida, era preciso enviar um outro tipo de fluido para controlar a temperatura. Mas a bomba que deveria enviá-lo estava em manutenção. Mesmo desligado, o reator começou a esquentar perigosamente, porque as reações atômicas continuariam ocorrendo por horas. Era o momento de os operadores agirem. Mas eles só pioraram o problema.

NÍVEIS DE PERIGO

A Agência Internacional de Energia Atômica dá notas para os acidentes.

Nível 0
Dano não significativo.

Nível 1
ANOMALIA Problemas de segurança menores.

Nível 2
INCIDENTE Exposição de indivíduo não envolvido com funções nucleares acima de 10 milisieverts (mSv). Níveis de radiação superiores a 50 mSv/h em zona de operação não prevista.
EXEMPLOS Atucha, na Argentina (2005), Cadarache, na França (1993), e Forsmark, na Suécia (2006).

Nível 3
INCIDENTE SÉRIO Exposição dez vezes superior ao limite anual estabelecido para a exposição dos trabalhadores com efeitos sanitários não letais
EXEMPLOS Vandellos, na Espanha (1989), Paks, na Hungria (2003), e Sellafield, no Reino Unido (2005).

Nível 4
ACIDENTE COM CONSEQUÊNCIAS LOCAIS Liberação menor de materiais radioativos, com pelo menos uma morte por radiação. Liberação de quantidades consideráveis de materiais radioativos dentro de uma instalação.
EXEMPLOS Tomsk, na Rússia (1993), Tokaimura, no Japão (1999), e Fleurus, na Bélgica (2006).

Nível 5
ACIDENTE COM CONSEQUÊNCIAS MAIORES Liberação limitada de materiais radioativos, várias mortes provocadas por radiação, danos graves no núcleo do reator.
EXEMPLOS Three Mile Island, nos EUA (1979), Windscale Pile, no Reino Unido (1957), e Goiânia, no Brasil (1987).

Nível 6
ACIDENTE GRAVE OU IMPORTANTE Liberação significativa de materiais radioativos.
EXEMPLOS Mayak, na Rússia (1957).

Nível 7
ACIDENTE MÁXIMO OU GRAVÍSSIMO Liberação grave de materiais radioativos com amplos efeitos para a saúde e o meio ambiente.
EXEMPLOS Chernobyl, na Ucrânia (1986), e Fukushima, no Japão (2011).

Fonte: Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA).

Getty Images

INCIDENTE EXEMPLAR

Sem informações claras, os moradores temeram pelo pior.

O painel da sala de controle da usina tinha mais de 1.200 luzes, e alguns dos comandos mais importantes ficavam mal posicionados. Diante de botões piscando e alertas sonoros, os quatro funcionários do turno da madrugada se viram perdidos, enquanto o reator continuava esquentando.

Para piorar o problema, um dos técnicos desligou o sistema de emergência antes do tempo. Resultado: as varetas de urânio ficaram expostas, derreteram a contaminaram a camada de água que havia sobrado no fundo do reator. Depois de muitas horas de tensão entre os técnicos, o problema só seria devidamente identificado e contido por volta das 15h.

A usina havia sido inaugurada em 1974, com um reator. Um segundo, o que apresentou o problema, estava ativo fazia pouco tempo quando do acidente – entrou em operação completa em dezembro de 1978. Nunca mais funcionou. Já o reator mais antigo continuou operando, até ser desligado em setembro de 2019. Poderia continuar operando até 2034, mas os custos de manutenção falaram mais alto.

Three Mile Island se tornou um caso exemplar de que a energia nuclear não era confiável. Os erros de projeto no painel e nos sistemas de segurança, a incapacidade do corpo técnico de lidar com o problema e a falta de informações claras para a população apavorada levantaram uma sombra sobre qualquer outra usina nuclear do país.

"Esse acidente mudou minha vida profissional", diz Najmedin Meshkati, especialista em usinas nucleares e pesquisador da Universidade do Sul da Califórnia. "Eu era estudante de doutorado em engenharia industrial e resolvi dedicar minha carreira a entender por que incidentes como esse acontecem."

NÍVEIS DE EXPOSIÇÃO

Conheça a escala de contato com a radiação nuclear.
MSV (milisievert) é a unidade padrão que mede o impacto da radiação.

0,4 MSV
Radiografia de tórax.

1,5 MSV
Raios X da coluna.

2,5 MSV
Mamografia; exposição média de uma pessoa à radiação natural em um ano.

10 MSV
Tomografia de corpo inteiro.

50 MSV
Exposição máxima no acidente da usina Three Mile Island, nos EUA.

100 MSV
Limite recomendado para trabalhadores expostos à radiação ao longo de cinco anos.

400 MSV
Nível de radiação máxima registrada na central de Fukushima no dia do acidente, por hora.

1.000 MSV
Dose única que causa síndrome radioativa.

5.000 MSV
Suficiente para matar metade da população exposta em até um mês.

10.000 MSV
Suficiente para destruir tecido intestinal, provocar hemorragia pelos poros da pele e matar em até 15 dias.

20.000 MSV
Dose suficiente para provocar dano cognitivo, levar a pessoa exposta a convulsões e matar em poucas horas.

300.000 MSV
Explosão do reator de número 4 da usina nuclear de Chernobyl.

Fonte: Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA).

EDITORA Abril
Fundada em 1950

VICTOR CIVITA (1907-1990)
ROBERTO CIVITA (1936-2013)

Publisher: Fábio Carvalho

Diretora de Marketing: Andrea Abelleira

SUPER INTERESSANTE

Diretor de Redação: Alexandre Versignassi
Editor: Bruno Garattoni
Editor-assistente: Bruno Vaiano
Repórteres: Guilherme Eler e Rafael Battaglia Popp
Editora de Arte: Juliana Krauss
Designers: Anderson C.S. de Faria, Carlos Eduardo Hara e Maria Pace
Estagiários: Ingrid Luisa e Maria Clara Rossini (texto) Lucas Jatobá (arte)

DOSSIÊ SUPER INTERESSANTE

Editor: Bruno Garattoni
Colaboraram nesta edição: Tiago Cordeiro (edição e textos), Eduardo Szklarz (texto), Victor Bianchin (texto) e André Bernardo (texto)
Estúdio Nono (projeto gráfico e edição de arte), Rodrigo Fortes (ilustração da capa)
Alexandre Carvalho (revisão) e Anderson C.S. de Faria (produção gráfica)

ENERGIA NUCLEAR
ISBN 978-85-69522-97-3

é um livro da Editora Abril S.A., distribuído em todo o país pela Dinap S.A. Distribuidora Nacional de Publicações, São Paulo.
O Dossiê Energia Nuclear não admite publicidade redacional.

IMPRESSO NA GRÁFICA ABRIL

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C794e

Cordeiro, Tiago
Energia nuclear. / Tiago Cordeiro ; Abril Comunicações. – São Paulo: Abril, 2020.
66 p ; il. ; 27 cm.

(Dossiê Superinteressante , ISBN 978-85-69522-97-3 ; ed. 411-A)

1. Física nuclear. 2. Energia nuclear. 3. Energia nuclear - Ciência - História. I. Título. II. Cordeiro, Tiago. III. Abril Comunicações. IV. Série.

CDD 539.7

EXISTE UM LUGAR DE ONDE NÃO HÁ COMO ESCAPAR...

O MISTÉRIO DOS BURACOS NEGROS

UM MINIDOCUMENTÁRIO DA SUPERINTERESSANTE

SUPER.doc

▶ Assista agora:

baixar
SOFTWARE
baixarsoftware.com